



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

KOIVISTONLUODON JA HARMAALINNAN RANTOJEN STABILITEETTITARKASTELU

Teemu Vehviläinen

RAKENNUS- JA YHDYSKUNTATEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA

Diplomityö

Kesäkuu 2021

TIIVISTELMÄ

Koivistonluodon ja Harmaalinnan rantojen stabiliteettitarkastelu

Teemu Vehviläinen

Oulun yliopisto, Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan tutkinto-ohjelma

Diplomityö 2021, 101 s. + 4 liitettä

Työn ohjaajat yliopistolla: DI Anne Tuomela, TkT Mauri Koskinen

Koivistonluoto ja Harmaalinna sijaitsevat Porissa Kokemäenjoen rannalla. Tämän työn tavoitteena oli selvittää kohdealueiden rantojen stabiliteetti ja siihen vaikuttavat tekijät. Lisäksi tavoitteena oli rajata stabiliteetin kannalta kriittisimmät alueet, sekä arvioida stabiliteetin kehittymistä tulevaisuudessa ja tarkastella korjaavien toimenpiteiden vaikutusta stabiliteettiin. Alueilla on ollut ongelmia stabiliteetin suhteen. Havaittavissa on ollut joen rannan sortumia, minkä lisäksi alueilla rakennukset ovat paikoin lähellä joen rantaa. Tutkittavilla alueilla joen rannat ovat jyrkkiä ja joessa on paikoin syvänteitä.

Aiemmin alueella suoritettujen pohjatutkimusten tulosten, luotausaineistojen ja maastomallien perusteella suunniteltiin alueella tehtävät uudet tutkimukset. Uusina tutkimuksina suoritettiin uusi joen pohjan luotaus, paino- ja siipikairauksia, sekä otettiin häiriintyneitä maanäytteitä, jotka tutkittiin Porin kaupungin maalaboratoriossa. Lähtötietojen ja uusien tutkimusten perusteella määritettiin stabiliteetin laskentakohteet. Laskentakohteiden valinnassa huomioitiin joessa tapahtunut eroosio, maanpinnan ja joen uoman geometria, rakennusten sijainti ja maaperän pohjaolosuhteet.

Työssä stabiliteetin laskenta suoritettiin 2D- ja 3D-laskentaohjelmistoilla. Laskennassa määritettiin pienimmillään alle yhden olevia kokonaisvarmuuksia. Rakennuksilta lähtevien liukupintojen kokonaisvarmuudet olivat pienimmillään hieman yli yhden, kun vaadittava kokonaisvarmuus on vähintään 1,8. 3D-laskennan tulokset mukailivat 2D-laskennan tuloksia. Lisäarvoa 3D-laskennasta tuo tuloksena saatava liukupinnan laajuus, eli kuinka leveä ja miten suuri tilavuudeltaan sortuma on.

Asiasanat: stabiliteetti, eroosio, Kokemäenjoki, Koivistonluoto, Harmaalinna

ABSTRACT

Stability analysis of river-banks in Koivistonluoto and Harmaalinna

Teemu Vehviläinen

University of Oulu, Degree Programme of Civil Engineering

Master's thesis 2021, 101 p. + 4 Appendixes

Supervisors at the university: M.Sc. (Tech.) Anne Tuomela, D.Sc. (Tech.) Mauri Koskinen

Koivistonluoto and Harmaalinna are located in Pori by the riverside of Kokemäki river. The aim of this thesis was to investigate the stability of the riverbanks in the target regions and the factors affecting on it. Furthermore, the aim was to define the most critical areas for stability, as well as estimate the development of the stability in the future and the effect of corrective actions. There have been problems with stability in the target areas. Failures of the river bank have been detected, along with buildings are located near the riverside. In the target area river banks are steep and there are deep local areas in the river.

New investigation was planned by the earlier soil investigations, probing data and terrain models. By the new site investigation probing of the riverbed, weight soundings, vane auger and disturbed samples were accomplished. Disturbed samples were analyzed in the laboratory at the City of Pori. Based on the initial data and the site investigations the targets of the stability calculations were determined. In determining the targets of stability calculations erosion, ground surface's and riverbed's geometry, location of buildings and substrate conditions were considered.

In this thesis stability calculations were carried out in both 2D- and 3D-sofwarees. In the stability calculations the lowest factors of safety were under one. The safety factors of slip surfaces from buildings were just over one in their lowest, when the required was 1,8. The results of 3D-stabilty calculations mirrored the results of 2D-calculations. The width and volume of the slip surface can be obtained from 3D-calculations, which adds its value.

Keywords: stability, erosion, Kokemäki river, Koivistonluoto, Harmaalinna

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty AFRY Finland Oy:lle Porin kaupungin toimeksiannosta. Työ suoritettiin aikavälillä 11/2020-06/2021. Haluan kiittää Porin kaupunkia kiinnostavasta ja opettavaisesta aiheesta, sekä nopeasta aikataulusta työhön liittyvien pohjatutkimusten toteutuksessa. Lisäksi haluan kiittää esimiehiäni vapauksista työn ja opintojen yhteensovittamisessa.

Kiitokset kaikille työn ohjaukseen osallistuneille. Porin kaupungilta ohjaukseen osallistuivat Taina Koivisto ja Michelle Kozlova, Afry Finland Oy:stä Marko Lehmikangas, sekä Oulun yliopistolta Anne Tuomela ja Mauri Koskinen.

Oulu, 30.6.2021

Teemu Vehviläinen

Teemu Vehviläinen

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO.....	7
2 STABILITEETILASKENTA	8
2.1 Luiskan stabiliteetti	8
2.2 2D-stabiliteetilaskenta (LEM)	11
2.3 3D-stabiliteetilaskenta (LEM)	14
2.4 2D- ja 3D-menetelmillä saatavien tulosten vertailu.....	18
3 JOKIYMPÄRISTÖN VAIKUTUS STABILITEETTIIN	21
3.1 Eroosio ja kiintoaineen kulkeutuminen.....	21
3.2 Joen törmän stabiliteettiin vaikuttavat tekijät.....	24
3.3 Kerrostuneen maarakenteen vaikutus.....	26
4 TUTKIMUSKOHTEIDEN KUVAUS	29
4.1 Porin alueen Kokemäenjoki.....	29
4.2 Koivistonluoto.....	34
4.3 Harmaalinna.....	38
5 STABILITEETILASKENNAN LÄHTÖKOHDAT	42
5.1 Luotaukset.....	42
5.1.1 Koivistonluoto.....	43
5.1.2 Harmaalinna.....	46
5.2 Pohjatutkimukset.....	49
5.3 Laskentapoikkileikkausten valinta	52
5.4 Laskentaparametrit.....	55
5.5 Vaadittava varmuuskerroin.....	58
5.6 Mitoittavat tilanteet	58
5.7 Laskentaohjelmisto ja laskentamenetelmät	60
5.8 Käytettävät laskentamenetelmät	61
6 TULOKSET	63
6.1 Koivistonluoto.....	63
6.1.1 Paaluväli 28 000-28 500.....	63
6.1.2 Paaluväli 28 500-29 100.....	66

6.1.3 Paaluväli 29 100-29 800.....	67
6.2 Harmaalinna.....	75
6.3 Takaisinlaskenta (Ulvila).....	82
6.4 Laskentatulosten yhteenveto.....	84
7 STABILITEETTIA PARANTAVAT TOIMENPITEET	87
8 JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOTOIMENPITEET.....	94

LIITEET:

Liite 1. Uoman poikkileikkaukset.

Liite 2. Koivistonluodon laskentatulosteet.

Liite 3. Harmaalinna laskentatulosteet.

Liite 4. Takaisinlaskennan tulosteet.

1 JOHDANTO

Kokemäenjoki on maamme viidenneksi suurimman vesistöalueen laskujoki. Kokemäenjoki alkaa Vammalan Liekovedestä ja virtaa Porin kaupungin halki laskien lopulta Selkämereen. Kokemäenjoen rannoilla on tapahtunut Porin kaupungin alueella useita sortumia. Työn aiheena on tarkastella stabiliteettia kahdessa Porin kaupunginosassa. Työssä tarkasteltavat kaupunginosat Koivistonluoto ja Harmaalinna sijaitsevat Kokemäenjoen rannalla. Työssä keskitytään tarkastelemaan tutkittavien alueiden joen ranta-alueiden stabiliteettia.

Joen rannan stabiliteettiin vaikuttavat useat tekijät. Stabiliteettiin vaikuttavat jokitörmän ominaisuudet, kuten törmän maalajit ja törmän kaltevuus. Joen törmän ominaisuuksien lisäksi stabiliteettiin vaikuttaa ajan kuluessa joessa virtaava vesi. Ajan kuluessa vesi voi aiheuttaa eroosiota joen törmään ja uomaan. Eroosioon suuruuteen vaikuttavat joen törmän ja uoman maalajit, sekä veden virtausominaisuudet.

Työn taustalla on havaitut ongelmat ja huoli ranta-alueilla stabiliteetin suhteen. Työn tavoitteena on selvittää tutkittavien alueiden tilanne stabiliteetin suhteen ja rajata kriittisimmät alueet. Lisäksi työssä on tavoitteena löytää syyt, jotka ovat johtaneet stabiliteetin heikkenemiseen tutkittavilla alueilla. Stabiliteetin kannalta kriittisimmillä alueilla tutkitaan stabiliteettia parantavien toimenpiteiden vaikutuksia. Tavoitteena on määrittää erilaisia vaihtoehtoja stabiliteetin parantamiselle.

Aiemmin Porin alueella tehdyissä tutkimuksissa on havaittu, että Kokemäenjoessa eroosio on paikoin voimakasta. Kohdealueiden stabiliteetin selvittämisen lisäksi työssä tutkitaan Kokemäenjoessa tapahtuvaa eroosiota. Työssä tarkastellaan eroosion kehitystä Kokemäenjoessa, eroosioon vaikuttavia asioita, sekä eroosion vaikutusta jokirannan stabiliteettiin.

Työssä keskitytään tarkastelemaan stabiliteettia Koivistonluodossa ja Harmaalinna. Lisäksi työssä tarkastellaan yhtä tutkittavien alueiden ulkopuolella tapahtunutta sortumaa. Muutoin työssä ei tarkastella tutkittavien kaupunginosien ulkopuolisia alueita. Tässä työssä tehtävä tarkastelu on yleistasoinen. Työ ei ota kantaa tonttikohtaisiin tilanteisiin.

2 STABILITEETILASKENTA

2.1 Luiskan stabiliteetti

Luiskan stabiliteetin eli vakavuuden laskennan tavoitteena on:

- luonnollisten luiskien kehityksen ja muodostumisen ymmärtäminen,
- lyhyen aikavälin (yleensä työnaikaisen) ja pitkän aikavälin stabiliteetin arvioiminen,
- luonnollisten ja rakennettujen luiskien sortumien todennäköisyyksien arviointi,
- tutkia sortumia ja ymmärtää murtuma mekanismit, sekä ympäristötekijöiden vaikutus,
- mahdollistaa sortuneiden luiskien uudelleensuunnittelu, sekä korjaavien ja ennaltaehkäisevien toimenpiteiden suunnittelu ja
- tutkia seismisten kuormitusten vaikutusta luiskiin ja penkereisiin (Abramson et al. 2001).

Kun tarvittavat maaparametrit, luiskan geometria, huokosvedenpaine ja pohjavedenpinta on määritetty, niin voidaan laskea luiskan stabiliteetti. Stabiliteettia eli vakavuutta tarkasteltaessa tutkitaan ovatko luiskan sortumaa vastustavat voimat suurempia kuin sortumaa aiheuttavat voimat. Tarkastelussa yleensä lasketaan varmuuskerroin jollakin rajatasapainomenetelmään perustuvalla menetelmällä. Varmuuskerroin F määritellään yhtälön (1) mukaisesti:

$$F = \frac{s}{\tau}, \quad (1)$$

missä s on maan leikkauslujuus ja τ on maan leikkausjännitys. (Duncan et al. 2014)

Kun leikkauslujuus ja leikkausjännitys ovat samansuuruiset, niin $F = 1$. Kun $F > 1$, niin luiska on vakaa, jos taas $F < 1$, niin luiska sortuu. Lisäksi käytännössä vaaditaan eri tekijöistä johtuen varmuusmarginaalia yleensä vähintään 30...50 % (Slunga 1990).

Luiskan stabiliteetin perusedellytys on siis, että leikkauslujuus on suurempi kuin leikkausjännitys. Luiskan epävakavuus voidaan tämän perusteella saavuttaa kahdella

tapaa, joko maan leikkauslujuuden laskiessa tai leikkausjännityksen kasvaessa. Maan leikkauslujuutta luiskank stabiliteetin kannalta pienentävät:

- kasvava huokosvedenpaine,
- jännityksen aiheuttama halkeilu luiskank harjalla,
- (saven) turpoaminen veden vaikutuksesta,
- maan jäätyminen/sulaminen, sekä kuivuminen/kostuminen ja
- rapautuminen.

Leikkausjännitystä puolestaan kasvattavat:

- kuormat luiskank harjalla,
- vedenpaine luiskank harjan halkeamissa,
- vesipitoisuuden kasvun aiheuttama maan painon kasvu,
- luiskank korkeuden tai kaltevuuskulman kasvu,
- luiskaa vasten olevan vedenpinnan lasku ja
- maanjäristysten aiheuttamat voimat.

Vesi on vaikuttavana tekijänä monessa edellä mainituissa leikkauslujuuteen, sekä leikkausjännitykseen vaikuttavassa asiassa. Käytännössä kaikissa luiskasortumissa jokin veden epävakautta aiheuttava vaikutus on mukana. Savi liittyy myös moneen jo mainituista tekijöistä, tai sen olemassaolo kasvattaa niiden vaikutusta. Maan turpoaminen ja halkeilu ovat esimerkiksi voimakkaampia savisessa maassa. (Duncan et al. 2014)

Maan leikkauslujuus muodostuu kahdesta päätekijästä, sisäisestä kitkasta ja koheesiosta ja se määritellään Mohr-Coulumbin kaavalla seuraavasti:

$$s = c + \sigma \tan \varphi, \quad (2)$$

missä c on koheesio,
 σ on normaalijännitys ja
 φ on kitkakulma (Huang 1983).

Sisäinen kitka muodostuu yhtälön (2) mukaan normaalijännityksen σ ja kitkakertoimen ϕ tulona. Kitkakerroin ilmaistaan tässä kitkakulman tangenttina. Sisäisen kitkakulman suuruuteen merkittävimmin vaikuttavat maan raekoostumus, maan tiiveys, sekä rakeiden muoto ja pyöristyneisyys. Koheesio aiheutuu maahiukkasten välisistä kiinnevoimista. Lisäksi koheesio johtuu mineraalihiukkasia ympäröivien vesivaippojen ja hiukkasten välisistä sähköstaattisista voimista. Maan rakeisuus ja vesipitoisuus vaikuttavat koheesion suuruuteen eniten. (Rantamäki et al. 1997)

Maalajit voidaan ryhmitellä maan leikkauslujuuden muodostumistavan perusteella kitkamaalajeihin, koheesiomaalajeihin ja välimuotomaalajeihin. Kitkamaalajeissa leikkauslujuus muodostuu rakeiden välisestä kitkasta. Tällöin leikkauslujuuden määräävä suure on maan sisäinen kitkakulma ϕ . Sora ja hiekka ovat tyypillisiä kitkamaalajeja. Koheesio c on puolestaan leikkauslujuuden määräävä tekijä koheesiomaalajeissa. Koheesiomaalajeissa maan sisäinen kitkakulma otaksutaan nolaksi, tyypillisin koheesiomaalaji on savi. Välimuotomaaleissa leikkauslujuus muodostuu kitkasta ja koheesiosta. Stabiliateetilaskennoissa välimuotomaalajien molempien osatekijöiden huomioinen voi kuitenkin johtaa epäilyttävän suuriin leikkauslujuuksiin. Niinpä välimuotomaalajit tulkitaan yleensä hallitsevamman lujuusparametrin mukaan kitka- tai koheesiomaalajeiksi. (Rantamäki et al. 1997)

Maan leikkauslujuus muotoillaan eri tavoin maalajista ja kuormitusolosuhteista riippuen. Leikkauslujuus ilmaistaan vakioarvona puhuttaessa suljetun tilan lujuudesta ja tehokkaan jännityksen funktiona puhuttaessa avoimen tilan vakavuudesta. Näitä leikkauslujuuden ilmaisutapoja vastaavat suljetun tilan menetelmä ja avoimen tilan menetelmä. Laskettaessa tehokkailla jännityksillä yhtälö (2) muuttuu seuraavasti:

$$s = c' + \sigma' \tan \phi' = c' + (\sigma - u) \tan \phi', \quad (3)$$

missä c' on tehokas koheesio,
 σ' on tehokas normaalijännitys (raepaine),
 ϕ' on tehokas kitkakulma,
 σ on normaalijännitys ja
 u on huokosvedenpaine.

Yhtälöstä (3) huomataan että tehokas normaalijännitys, niin sanottu raepaine pienenee huokosvedenpaineen kasvaessa ($\sigma' = \sigma - u$). (Rantamäki et al. 1997; Slunga 1990) Yhtälön (3) mukaisten tehokkaiden jännitysten käyttö siis edellyttää huokosvedenpaineen u tuntemista. Tehokkaiden jännitysten käyttö on yleispätevämpi menettelytapa kokonaisjännitysten ($\phi = 0$) menetelmään verrattuna (Helenelund 1967). Koska maan käyttäytyminen noudattaa tehokkaita jännityksiä, niin tulisi stabiliteetin laskennassa tähdätä suorittamaan laskenta tehokkaita lujuusparametreja käyttäen.

Suljetun tilan menetelmää voidaan myös kutsua kokonaisjännitysten menetelmäksi. Kokonaisjännitysten menetelmässä $\phi = 0$, eli lujuus muodostuu kokonaan koheesiosta. Tällöin lujuus ilmaistaan koheesiomaan suljettuna leikkauslujuutena s_u . Kokonaisjännitysten menetelmää käytetään yleensä laskettaessa lyhyen ajan vakavuutta koheesiomailla. (Rantamäki et al. 1997; Slunga 1990)

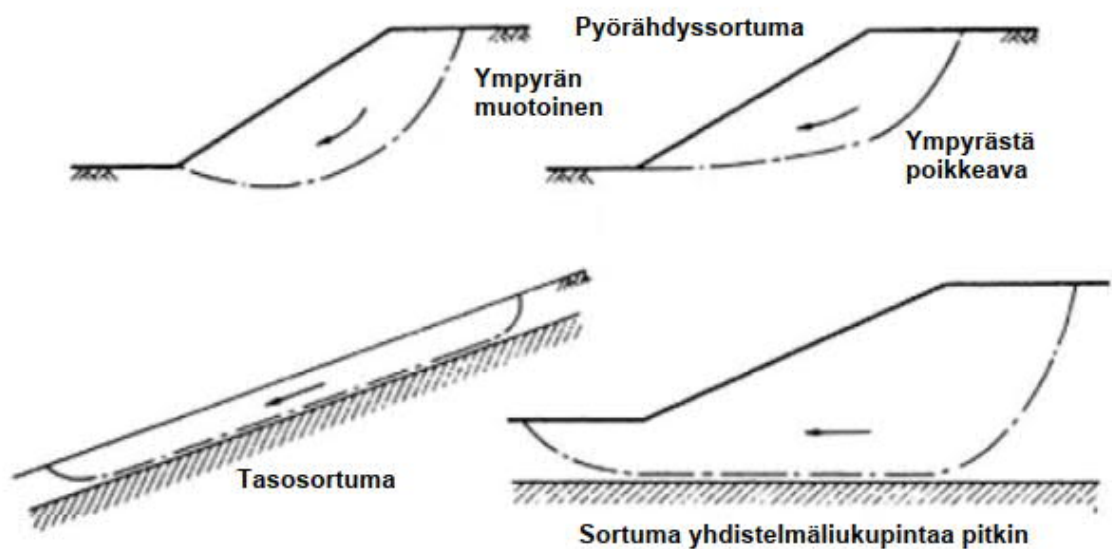
2.2 2D-stabiliteettilaskenta (LEM)

Yleinen luiskien stabiliteetin laskentamenetelmä on rajatasapainomenetelmä (limit equilibrium method, LEM). Menetelmässä lasketaan varmuuskerrointa F oletetulle liukupinnalle. Varmuuskertoimen oletetaan olevan vakio koko liukupinnalla. Menetelmällä lasketaan varmuuskerrointa useilta eri liukupinnoilta, jotta pystytään määrittämään kriittisin liukupinta. Kriittisin liukupinta on se, jolla on pienin varmuuskerroin. Liukupinta voi olla menetelmän mukaan ympyränmuotoinen, spiraali, suoraviivainen tai näiden yhdistelmä. (Duncan et al. 2014)

Rajatasapainomenetelmä noudattaa Slungan (1990) mukaan seuraavia periaatteita:

1. Sortuman oletetaan tapahtuvan maan sisällä kulkevaa liukupintaa pitkin. Maa on murtotilassa liukupinnalla.
2. Oletetaan liukupinnan muoto tunnetuksi ja tutkitaan useita valitun muotoisia liukupintoja.
3. Jokaiselle liukupinnalle lasketaan leikkausjännitys ja leikkauslujuus. Näitä verrataan, jolloin saadaan varmuuskerroin.
4. Etsitään liukupinta, jolla on pienin varmuuskerroin.

Yleisesti ympyrän muotoiset liukupinnat liitetään homogeenisiin ja isotrooppisiin maaolosuhteisiin, kun taas ympyrästä poikkeavat liukupinnat liitetään epähomogeenisiin olosuhteisiin. Murtumat taso- ja erilaisia yhdistelmäliukupintoja pitkin tapahtuvat, kun kaksi maaparametreiltään huomattavasti erilaista maakerrosta ovat päällekkäin. Tällöin liukupinta kulkee heikomman leikkauslujuuden omaavan materiaalin puolelta. Tasoliukupinnan tapauksessa massojen siirtyminen tapahtuu yleensä luiskan suuntaista tasoa pitkin (Slunga 1990). Yhdistelmäpintoja pitkin muodostuvat liukupinnat koostuvat kaarevista ja suorista osista. Liukupinnan muotoon vaikuttavat geologiset olosuhteet, rakenteen luonne ja epäjatkuvuudet maassa, kuten halkeamat ja murtumat. (Craig 2004)

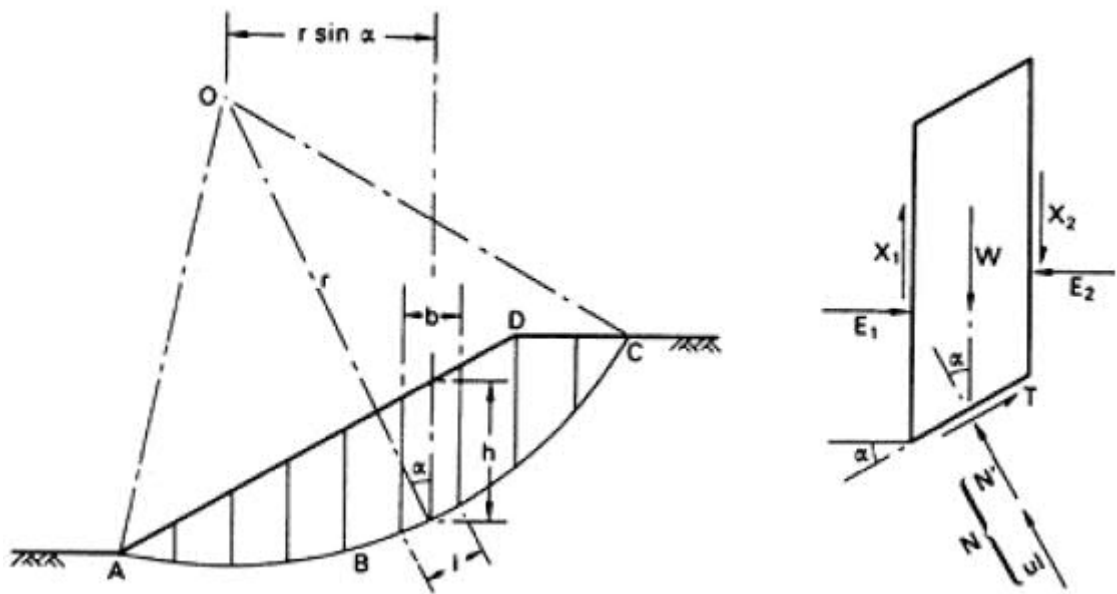


Kuva 1. Luiskien sortumatyyppejä (mukaillen Craig 2004).

Osa menetelmistä tarkastelee tasapainotilannetta koko liukupinnan ja maanpinnan välisellä osuudella. Tällöin tasapainotila määritetään yhdelle kokonaisuudelle. Nykyään yleisempiä ovat menetelmät, joissa liukupinnan ja maanpinnan väli jaetaan pystysuoriin lamelleihin. Tällöin laskennassa tarkastellaan jokaisen lamellin tasapainoa erikseen. Lamellien määrään vaikuttavat luiskan geometria, maalajien vaihtelevuus, laskennan tarkkuusvaatimukset ja suoritetaanko laskenta käsin vai tietokoneohjelmalla. Nykyään laskelmat tehdään tietokoneohjelmilla, mikä ei rajoita lamellien määrää. Laskenta vie vain vähän aikaa, vaikka laskennassa käytettävien lamellien määrä olisi suuri. (Duncan et al. 2014)

Kuvassa 2 on esitetty lamellimenetelmän periaate. Kyseisessä tapauksessa liukupinta on ympyrän muotoinen. Yksittäiseen lamelliin vaikuttavat voimat ovat:

- lamellin kokonaispaino W ,
- lamellin alapinnassa vaikuttava normaalivoima N ,
- leikkausvoima lamellin pohjalla T ,
- normaalivoimat lamellin sivuilla E_1 ja E_2 , sekä
- leikkausvoimat lamellien sivuilla X_1 ja X_2 (Craig 2004).



Kuva 2. Lamellimenetelmän periaate ja yksittäiseen lamelliin vaikuttavat voimat (Craig 2004).

Menetelmästä riippuen lamelleissa voidaan tarkastella pystysuuntaisten voimien tasapainoa, vaakasuuntaisten voimien tasapainoa, sekä momenttitasapainoa missä tahansa pisteessä. Rajatasapainomenetelmissä käytetään ainakin jotakin näistä tasapainoehdoista luiskan varmuuskerrointa laskiessa. Osa menetelmistä täyttää kaikki tasapainoehdot ja osa vain jonkin edellä mainituista. (Duncan et al. 2014) Taulukossa 1 on esitetty eri menetelmien voima- ja momenttitasapainoehtojen toteutumista. Lisäksi taulukossa on esitetty, huomioidaanko laskentamenetelmässä lamellien välisiä normaali- ja leikkausvoimia.

Taulukko 1. Lamellimenetelmien toteuttamat tasapainoehdot, sekä lamellien väliset normaali- ja leikkausvoimat (mukaillen Abramson et al. 2001; GEO-SLOPE 2014).

Menetelmä	Voimatasapainoehto pystysuunnassa	Voimatasapainoehto vaakasuunnassa	Momentti-tasapainoehto	Lamellien väliset normaalivoimat	Lamellien väliset leikkausvoimat
Fellenius	Ei	Ei	Kyllä	Ei	Ei
Bishop's Simplified	Kyllä	Ei	Kyllä	Kyllä	Ei
Janbus's Simplified	Kyllä	Kyllä	Ei	Kyllä	Ei
Spencer	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä
Morgenstern-Price	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä
Corps of Engineers	Kyllä	Kyllä	Ei	Kyllä	Kyllä
Lowe-Karafiath	Kyllä	Kyllä	Ei	Kyllä	Kyllä
Janbus Generalized	Kyllä	Kyllä	Ei	Kyllä	Kyllä

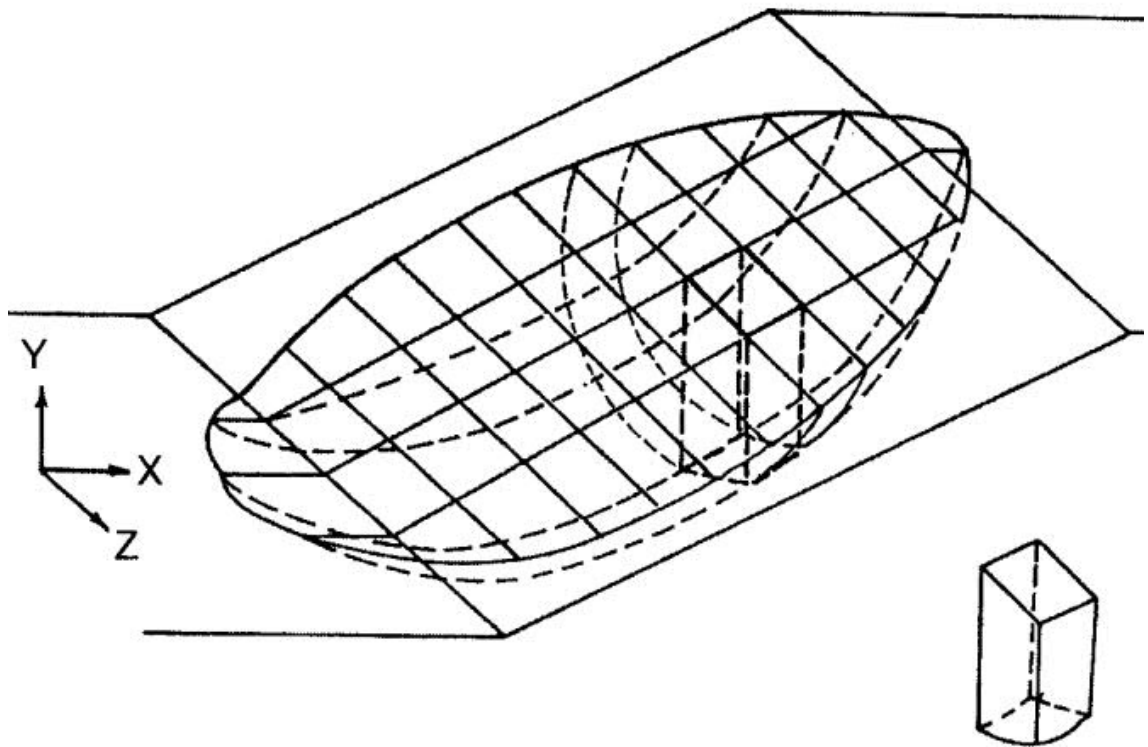
Lamellimenetelmässä on aina enemmän tuntemattomia muuttujia kuin tasapainoyhtälöitä. Tämä tarkoittaa, että varmuuskertoimen laskennan kannalta ongelma on staattisesti määrittämätön. Siksi täytyy tehdä alkuoletuksia, jotta tuntemattomien muuttujien määrää saadaan vähennettyä. Eri laskentamenetelmät tekevät erilaisia oletuksia tuntemattomien muuttujien suhteen. (Duncan et al. 2014)

Käytettäessä voimatasapainot täyttäviä laskentamenetelmiä, voi liukupinta olla ympyrästä poikkeava. Kun taas käytettäessä menetelmiä, joissa molemmat voimatasapainoehdot eivät täyty, oletetaan murtuman tapahtuvan ympyrän muotoista liukupintaa pitkin (Jaffari & Karimi 2014). Esimerkiksi Bishopin yksinkertaistetussa menetelmässä (Bishop's Simplified) sortuman oletetaan tapahtuvan ympyrän muotoista liukupintaa pitkin, kun taas Janbusin yksinkertaistetussa menetelmässä (Janbus's Simplified) sortuma voi tapahtua ympyrästä poikkeavaa liukupintaa pitkin.

2.3 3D-stabiliateettilaskenta (LEM)

Kolmiulotteinen stabiliateettilaskenta on erityisen tärkeää tilanteissa, joissa luiskun geometria ja liukupinta muuttuvat huomattavasti sivusuunnassa, maa on epähomogeenista ja anisotrooppista, sekä kun luiska on paikallisesti kuormitettu. Kolmiulotteisen tarkastelun tärkeyttä lisää myös se, että todellisuudessa suuri osa luiskun

sortumista on kolmiulotteisia, muodoltaan kulhoa muistuttavia (kuva 3). (Chakraborty & Goswami 2016)



Kuva 3. Kolmiulotteinen liukupinta jaettuna pylväisiin, sekä yksittäinen pylväs (Abramsom et al. 2001).

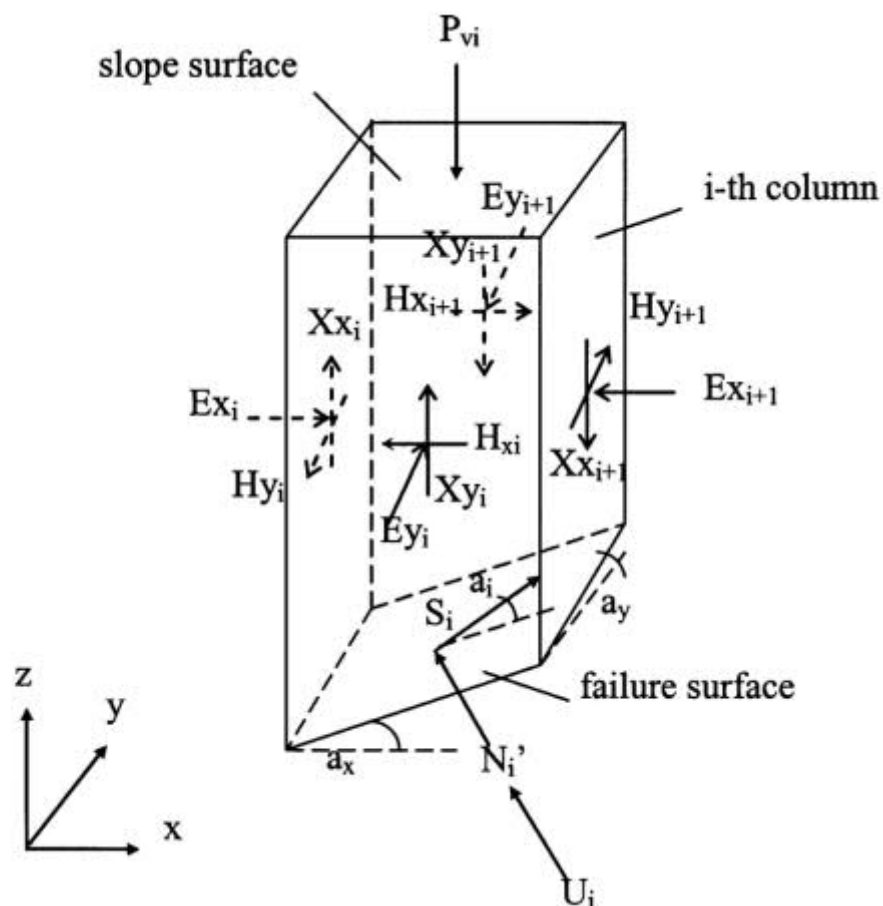
3D LEM -menetelmät pohjautuvat vahvasti kaksiulotteisiin lamellimenetelmiin. Kun kaksiulotteisen tarkastelun lamelleihin lisätään kolmas ulottuvuus, niin lamellit saadaan muutettua pylväiksi. Kolmiulotteiset menetelmät vaativat kaksiulotteisten menetelmien tapaan alkuoletuksia, jotta stabiliteetti saadaan laskettua. Kolmannen ulottuvuuden myötä tulee uusia oletuksia, kuten kolmiulotteinen liukupinta, epäsymmetrinen liukupinnan muoto ja liukumissuunta, sekä pylväiden sisäiset voimat. (Kalatehjari & Ali 2013)

Taulukossa 1 esitetyt kaksiulotteiset lamellimenetelmät, kuten Bishopin, Janbun ja Morgenstern-Pricen menetelmät, jotka täyttävät voima- ja/tai momenttitasapainoehdot ovat sovellettavissa kolmiulotteisiksi. Kolmiulotteisissa menetelmissä voimat ja momentit ratkaistaan kahdessa toisiaan kohtisuorassa olevassa tasossa. Pystysuorat voimat määrittävät pylvään pohjassa vaikuttavan normaali- ja leikkausvoiman. (Rocscience 2017)

Yksittäiseen pylvääseen vaikuttavia voimia on esitetty kuvassa 4. Pylvääseen vaikuttavat seuraavat ulkoiset ja sisäiset voimat:

- tehokas normaalivoima N ,
- huokosvedenpaineesta johtuva voima U ,
- pylvään pohjaan mobilisoitunut leikkausvoima S ,
- liukupinnan suunta a ,
- pylväiden väliset normaalivoimat E ,
- pylväiden väliset pystysuuntaiset leikkausvoimat X ,
- pylväiden väliset vaakasuuntaiset leikkausvoimat H ,
- ulkoinen pystysuuntainen voima P ja
- pylvään paino W (Cheng & Yip 2007).

Pylvään painon ja pystysuuntaisen kuormituksen oletetaan vaikuttavan keskellä pylvästä.



Kuva 4. Pylvääseen vaikuttavat voimat (Cheng & Yip 2007).

Chengin & Yipin (2007) esittämän menetelmän mukaan varmuuskerroin luiskan sortumaa vastaan voidaan esittää seuraavilla oletuksilla:

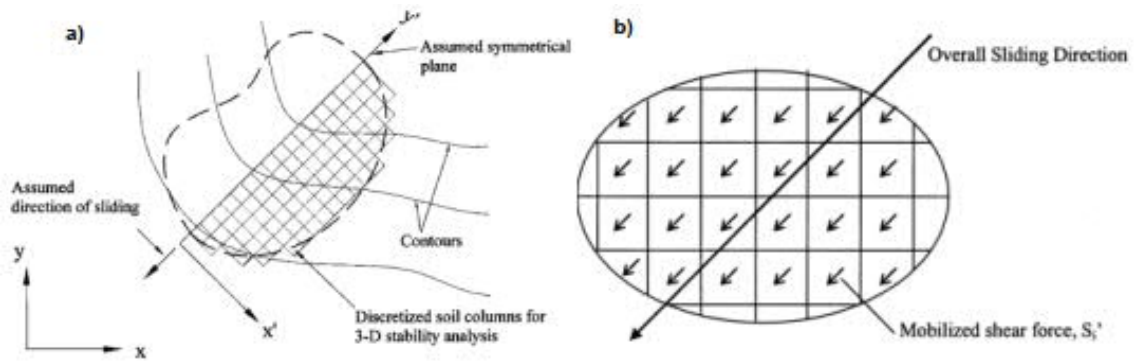
1. Mohr-Coulombin murtokriteeri on voimassa.
2. Varmuuskerroin määritellään liukumasuunnan perusteella, niin että voima- ja momenttitasapainoehdot täyttyvät.
3. Liukumasuunta on sama kaikilla pylväillä.

Nyt varmuuskerroin voidaan määritellä seuraavasti:

$$F = \frac{Sf_i}{S_i} = \frac{C_i + N'_i \tan \varphi'}{S_i}, \quad (4)$$

missä S_{fi} on leikkauslujuus pylvään pohjassa,
 C_i on tehokas koheesio pylvään pohjan pinta-alalla,
 N'_i on tehokas normaalivoima ja
 S_i on pylvään pohjalla vaikuttava leikkausvoima (Cheng & Yip 2007).

Kaksiulotteisissa lamellimenetelmissä liukupinta on valitun poikkileikkauksen suuntainen. Kolmiulotteisten menetelmien haittana on ollut liukupinnan liukumasuunnan suhteen tehtävä oletus. Kuvan 5 kohdassa a) on esitetty periaate, kun liukupinta on määritetty etukäteen. Kun liukupinta on määritetty etukäteen, niin koordinaatisto asetetaan liukupinnan mukaan. Liukupinnan suunnasta tehtävä oletus on hankalaa, varsinkin jos maaston geometria on epäsäännöllistä ja maaperä on geologisilta ominaisuuksiltaan vaihtelevaa (Huang et al. 2002). Chengin & Yipin (2007) mukaan liukupinnalle voidaan määrittää yksiselitteinen suunta. Siinä oletuksena on, että kaikki maakappaleen pylväät liikkuvat samaan suuntaa. Kuvan 5 kohta b) havainnollistaa tätä.



Kuva 5. Kolmiulotteisten menetelmien liukupinnat (mukaihen Cheng & Yip 2007; Huang et al. 2002).

Taulukossa 2 on esitetty erilaisia 3D-menetelmiä. Taulukossa on kerrottu kyseisen menetelmän kehittäjä, mihin 2D-menetelmään kyseinen 3D-versio pohjautuu, määräytyykö liukupinnan suunta automaattisesti, käyttökohteet luiskan geometrian mukaan, sekä liukupinnan muoto.

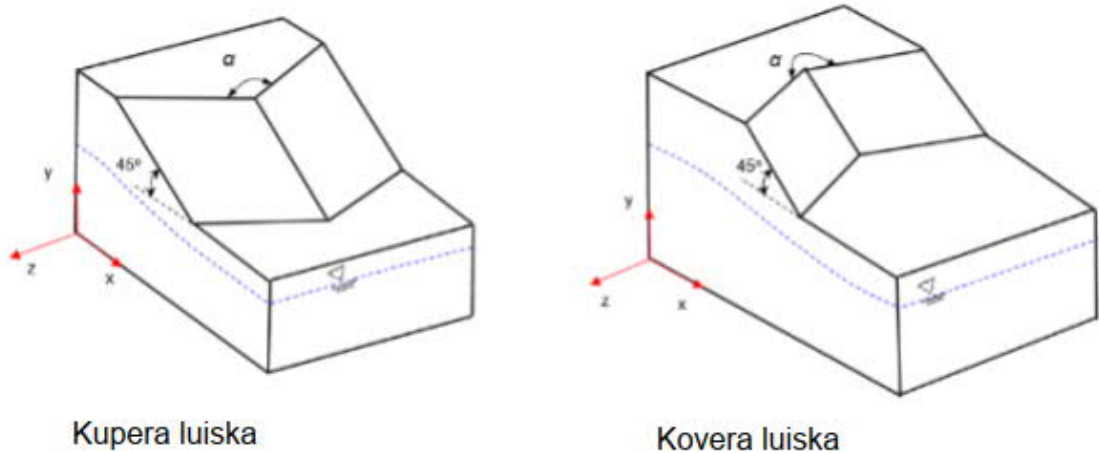
Taulukko 2. Eri 3D-menetelmiä (mukaihen Kalatehraj & Ali 2013).

3D-menetelmän kehittäjä (vuosi)	Mihin 2D-menetelmään pohjautuu	Liukupinnan suunnan määrittäminen	Käytettävyys, luiskan geometria	Liukupinnan muoto
Hungr et al. (1989)	Bishop, Janbu	Ei	Yksinkertainen	Symmetrinen
Huang et al. (2002)	Janbu	Kyllä	Monimutkainen	Yleisluoteinen
Cheng & Yip (2007)	Bishop, Janbu, Morgenstern-Price	Kyllä	Monimutkainen	Pallomainen
Sun et al. (2011)	Morgenstern-Price	Ei	Monimutkainen	Yleisluoteinen

2.4 2D- ja 3D-menetelmillä saatavien tulosten vertailu

Useimmat kolmiulotteiset rajatasapainomenetelmät pohjautuvat kaksiulotteisiin menetelmiin. Sekä kaksiulotteisissa, että kolmiulotteisissa menetelmissä joudutaan tekemään oletuksia, jotta varmuuskerroin saadaan laskettua. Useat tutkimukset ovat osoittaneet, että kolmiulotteisilla menetelmillä saatavat varmuuskertoimet ovat suurempia kaksiulotteisiin verrattuna (Chakraborty & Goswami 2016). Taulukkoon 3 on koottu 2D- ja 3D-menetelmien välisiä eroja eri tutkimuksista.

Geometria vaikuttaa merkittävästi kolmiulotteisilla menetelmillä saataviin varmuuskertoimiin. Chaudhary et al. (2016) tekemä tutkimus osoittaa, että varmuuskertoimien ero kasvaa, mikäli luiska on muodoltaan kovera. Toisaalta tutkimuksessa todettiin, että myös muodoltaan kuperien luiskien varmuuskerroin on yleensä suurempi kolmiulotteisilla menetelmillä. Lisäksi huomioitiin, että koheesiomaissa varmuuskertoimien suhde muuttuu herkemmin geometrian muuttuessa.



Kuva 6. Geometrialtaan kupera ja kovera luiska (mukaillen Fredlund et al. 2010).

Taulukkoon 3 on koottu eroavaisuuksia varmuuskertoimien välillä, käytettäessä kaksi- ja kolmiulotteisia laskentamenetelmiä. Taulukon viimeisessä sarakkeessa on ilmaistu, kuinka paljon suurempi kolmiulotteisen menetelmän varmuuskerroin on kaksiulotteiseen verrattuna. Taulukosta nähdään, että varmuuskertoimissa suurin ero on geometrialtaan koverissa luiskissa, 3D-menetelmällä saatu varmuuskerroin voi olla jopa 59 % suurempi, mitä 2D-menetelmällä saatu varmuuskerroin.

Taulukko 3. Varmuuskertoimien erot 2D- ja 3D-menetelmien välillä (mukaihen Chaudhary et al. 2016; Fredlund et al. 2010; Zhang et al. 2014).

Julkaisu	Kuvaus	$F_{3D} > F_{2D}$ (%)
Three-dimensional slope stability analysis method	Varmuuskertoimien välinen ero koheesiomailla	10-40%
Three-dimensional analysis of slides in cohesive soils	Varmuuskertoimien välinen ero koheesiomailla	3-30%
Three-Dimensional Slope Stability: Geometry Effects	Geometrian vaikutus varmuuskertoimeen	Kuperat luiskat: 10-25% Koverat luiskat: 32-38%
Comparison of 2-D and 3-D slope stability analyses for unsaturated soil slopes	Pohjavedenpinnan yläpuolisten kerrosten vaikutus varmuuskertoimeen	Yksinkertainen loiva luiska: 9-16% Yksinkertainen jyrkkä luiska: 12-18% Koverat luiskat: 20-59%
Moving from 2D to a 3D Unsaturated Slope Stability Analysis	Varmuuskertoimen kasvu geometrialtaan yksinkertaisilla luiskilla, pohjavedenpinnan yläpuolisten kerrosten vaikutus	4-20%

Tyypillisesti kaksiulotteisilla menetelmillä laskettavalta stabiliteetilta vaaditaan varmuuskertoimen F arvoksi 1,5. Samaa vaatimusta varmuuskertoimen osalta ei tulisi kuitenkaan käyttää kolmiulotteisilla menetelmillä laskettaessa, koska 3D-menetelmät huomioivat liukuvan massan sivuilta aiheutuvan leikkausvastuksen. Tästä syystä 3D-menetelmillä saatavat varmuuskertoimet ovat suurempia mitä 2D-menetelmillä saatavat, joten 3D-menetelmillä laskettaessa tulisi vaatia suurempaa varmuuskerrointa. (Stark & Ruffing 2017) Taulukossa 4 on esitetty kohteen luonteesta riippuen vaadittavia varmuuskertoimia 2D- ja 3D-menetelmille.

Taulukko 4. Suositeltavat varmuuskertoimet (mukaihen Stark & Ruffing 2017).

Maaparametrien epävarmuus	Välitön uhka ihmishengelle	Suurten ympäristövaikutusten uhka	Suosittelava 2D-laskennan varmuuskertoimen minimi	Suosittelava 3D-laskennan varmuuskertoimen minimi
Pieni	Pieni	Pieni	1,3	1,4
Pieni	Suuri	Suuri	1,5	1,7
Pieni	Pieni	Suuri	1,3	1,5
Pieni	Suuri	Pieni	1,5	1,7
Suuri	Pieni	Pieni	1,5	1,7
Suuri	Suuri	Suuri	2,0	2,3
Suuri	Pieni	Suuri	1,5	1,7
Suuri	Suuri	Pieni	2,0	2,3

3 JOKIYMPÄRISTÖN VAIKUTUS STABILITEETTIIN

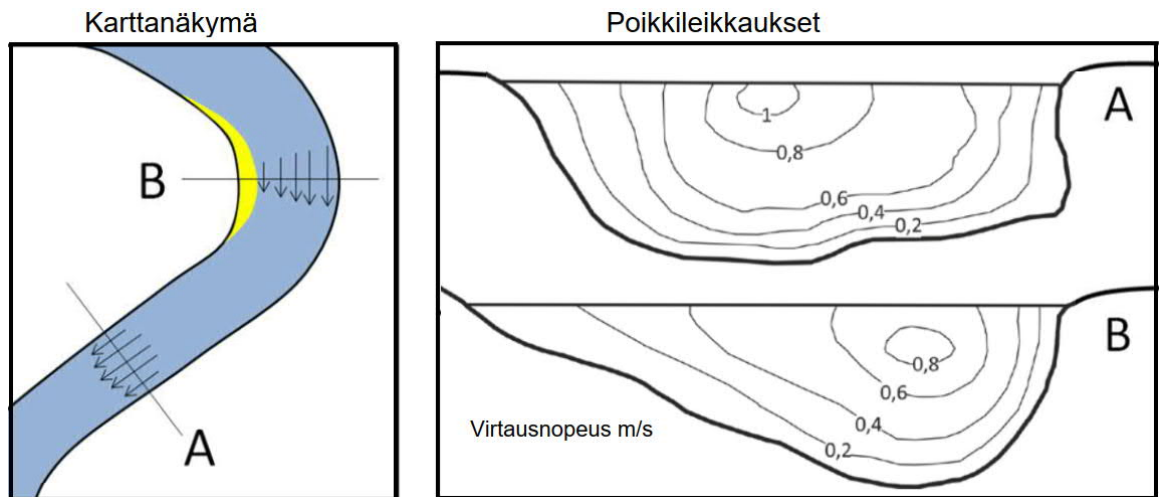
3.1 Eroosio ja kiintoaineen kulkeutuminen

Eroosio on kallioperän ja maaperän kulumista veden, jään ja tuulen vaikutuksesta. Aiheutumistavan perusteella eroosiolajeiksi voidaan erotella vesieroosio, tuulieroosio, jääeroosio, painovoimaeroosio ja ihmisen aiheuttama eroosio. Veden aiheuttama vesieroosio jaetaan pintaeroosioon ja uomaeroosioon. Sadepisarot ja pintavalunta aikaansaavat pintaeroosiota. Uomaeroosiossa virtaava vesi kuluttaa ainesta uoman pohjalta ja reunoista. (Seuna & Vehviläinen 1986)

Joen virtaava vesi kuluttaa uomaansa, kuljettaa irrottamaansa ainesta ja kasaa sitä joen suistoon. Joessa virtaavan veden liike-energia aiheuttaa uomaeroosiota. Uomaeroosio aiheuttaa jokien syvenemistä ja mutkittelua eli meanderointia. Tässä työssä puhuttaessa eroosiosta, tarkoitetaan uomaeroosiota. Eroosion suuruus riippuu virtaamasta ja se on voimakkainta siellä, missä veden virtausnopeus on suurimmillaan. Virtaaman ja virtausnopeuden lisäksi eroosion suuruuteen vaikuttaa uoman pohjamateriaalin eroosioherkkyys. Eroosioherkkyyteen eli erodoituvuuteen taas vaikuttavat maan raekoko, partikkelien muoto, mekaaninen koostumus, kerrostuneisuus, kasvipeite ja maanpinnan kaltevuus. (Seuna & Vehviläinen 1986)

Uoman geometria vaikuttaa veden virtausnopeuteen ja vallitseviin virtausolosuhteisiin. Poikkileikkauksen kasvaessa virtausnopeus pienenee, kun taas poikkileikkauksen pienentyessä virtausnopeus kasvaa. Tätä voidaan havainnollistaa *virtauksen jatkuvuus* -teorialla. Siinä perustana on, että virtaama pysyy samana koko uoman matkalla, jos vesimäärä ei muutu. Poikkileikkauksen pienentyessä siis virtausnopeuden on kasvettava, sillä sama vesimäärä kulkee sekä pienemmän, että isomman poikkileikkauksen läpi (Charlton 2008).

Virtausnopeus uomassa vaihtelee uoman pohjan ja reunojen veteen aiheuttaman kitkan vaikutuksesta. Mitä lähempänä uoman pohjaa tai reunaa vesimolekyyli virtaa, niin sitä voimakkaammin kitkavoima pyrkii sen liikettä estämään. Nopeus on suurempi etäämmällä uoman pohjasta, eli lähellä pintaa. Kuvassa 7 on esitetty virtausnopeuksien jakautumista. (Knighton 1998)

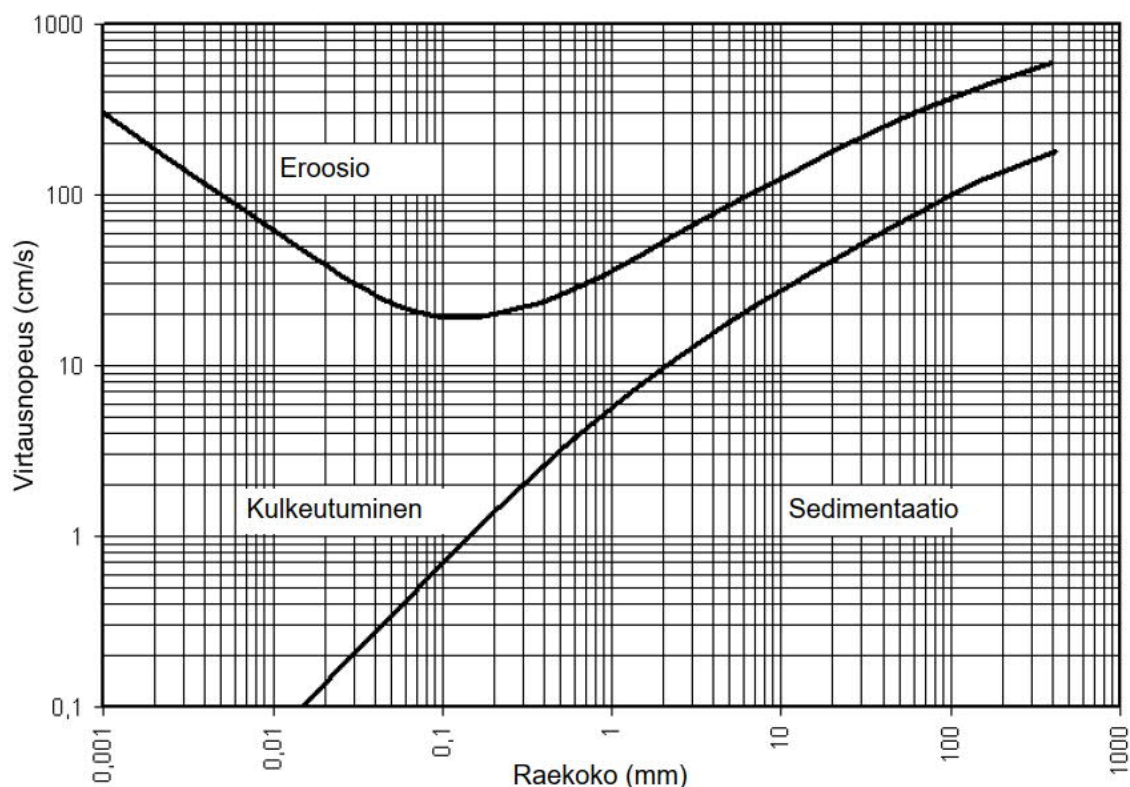


Kuva 7. Virtausnopeuden jakautuminen uomassa (mukaillen Knighton 1984).

Meanderoiva uomarakenne on tyypillinen alavilla hiekka- ja savimailla, jolloin virran eroosio kuluttaa rantatörmää ulkokaarteissa ja sedimenttiä kertyy sisäkaarteisiin (Turunen ym. 2019). Ulkokaarre on syvä ja sisäkaarre matala. Ulkokaarteessa eroosio ilmenee jyrkkinä luiskina. Kaarten poikkileikkauksessa suurin virtausnopeus on ulkokaarten syvässä osassa. Kuvan 7 poikkileikkaus B havainnollistaa tilannetta. Uoman suoralla osuudella (poikkileikkaus A) virtausnopeus jakautuu symmetrisesti.

Virtauksen voimistuessa kasvaa myös uomassa olevaan partikkeliin kohdistuva voima. Virtauksen kasvaessa riittävän voimakkaaksi päästään tilanteeseen, jossa partikkelin liikkeeseen johtavat voimat ovat yhtä suuret kuin liikettä vastustavat voimat. Tätä tilannetta kuvataan kriittisellä leikkausjännityksellä tai kriittisellä nopeudella. Kun partikkelin liikkeelle panevat voimat kasvavat edelleen, niin partikkeli lähtee liikkeelle. (Knighton 1998)

Raekoolla on suora vaikutus partikkelien eroosioherkkyyteen. Tätä voidaan havainnollistaa Hjulströmin diagrammilla (kuva 8). Kuvasta nähdään kuinka eroosio, sedimentin kulkeutuminen ja sedimentaatio jakaantuvat kriittisen virtausnopeuden ja sedimentin raekoon mukaan. Diagrammi siis kuvaa raekoon ja veden virtausnopeuden välistä suhdetta. Kuvasta 8 huomataan, että helpoiten erodoituvia ovat raekooltaan 0,06-0,3 mm olevat partikkelit. Kyseinen raekoko vastaa hienoa/keskikokoista hiekkaa. Tätä raekokoa suurempien ja pienempien partikkelien irtautumiseen vaaditaan suuremmat virtausnopeudet.



Kuva 8. Hjulströmin diagrammi (mukaillen Hjulström 1935).

Diagrammista huomataan, että partikkelien erodoitumiseen vaadittava virtausnopeus ensin laskee ja sitten nousee raekoon kasvaessa. Tämän selittää koheesio. Koheesio vuoksi pienimpien partikkelien liikkeellelähtö uoman pohjasta vaatii suuremman voiman mitä raekooltaan suurempien partikkelien liikkeellelähtö. Merkittävintä koheesio on partikkeleilla, joiden raekoko on alle 0,04 mm. Koheesio on myös huomattavaa raekooltaan 0,04-0,4 mm olevilla partikkeleilla (Roberts ym. 1998). Koheesiomaalajeiksi luokitellaan siltti- ja savimaat. Koheesiomaiden eroosioherkkyyteen vaikuttaa partikkelin omien ominaisuuksien lisäksi partikkelien välisten koheesiosidosten voimakkuus (Knighton 1998).

Uomassa oleva kasvillisuus pienentää veden virtausnopeutta, mikä ehkäisee eroosiota. Uomassa kasvillisuus keskittyy rannoille ja pienentää virtausnopeutta siellä, mikä taas kasvattaa virtausnopeutta uoman niiltä osin, missä kasvillisuutta ei ole. Juuristo puolestaan sitoo hienot maapartikkelit toisiinsa eroosiovoimia tehokkaasti vastustavaksi matoksi. Tämän tehokkuutta lisää se, että juuristo yleensä keskittyy maan ylimpään kerrokseen. (Seuna & Vehviläinen 1986)

Joessa kiintoaineen kulkeutuminen jaetaan pohjakulkeutumiseen ja suspendoituneen kiintoaineen kulkeutumiseen. Edellä mainituista suspendoituneen kiintoaineen kulkeuma on merkittävästi suurempaa, noin 90 % koko kiintoainekulkeutumasta (Vehviläinen 1981). Pohjakulkeutumasta voidaan vielä erotella vierimällä tai hyppäyksin tapahtuva partikkelin liike. Nämä prosessit eivät ole toisistaan riippuvaisia, sillä sama maapartikkeli voi uoman yhdessä poikkileikkauksessa kulkeutua suspensiossa ja toisessa poikkileikkauksessa liikkua pohjakulkeutumana. Näin voi esimerkiksi käydä, kun joen poikkileikkaus kasvaa ja veden virtausnopeus pienenee. Suspension virtauksen mukana kulkeutuu tyypillisesti hienompi aines, eli siltti, savi ja orgaaninen aines (turve). Pohjakulkeutumana taas pohjaa pitkin kulkeutuu karkeampi aines, kuten hiekka ja sora. (Seuna & Vehviläinen 1986)

Joen kyky kuljettaa kiintoainetta paranee keväällä, kun sulamisvedet lisäävät joen virtaamia. Talven aikana joen pohjalle kerääntynyt aines lähtee liikkeelle virtausnopeuden kasvun seurauksena. Kiintoaineen määrää lisää korkealle noussut vesi, joka huuhtoo rannoilta materiaalia. Vaikutusta lisää joessa liikkuva jää, joka hankaa joen törmää. Merkittävä osa joen kiintoaineen kulkeutumisesta tapahtuu ylivirtaamien aikana, mikä tarkoittaa ajankohtana kevättä ja syksyä. Pääasiallinen syy tähän on suurempien virtauksien ja virtausnopeuksien kyky kuljettaa enemmän kiintoainetta. Tämän lisäksi kiintoaineen tarjonta on mainittuina ajankohtina suuri, koska eroosiolta suojaava kasvillisuus on poissa. (Vehviläinen 1981)

3.2 Joen törmän stabiliteettiin vaikuttavat tekijät

Penkereen stabiliteetti riippuu maalajien ominaisuuksista ja penkereen geometriasta. Maan leikkauslujuuden kaksi päätekijää ovat kitkakulma ϕ ja koheesio c . Kitkakulman ja koheesio kasvaessa, kasvaa myös penkereen stabiliteetti. Tilavuuspainon ja penkereen korkeuden kasvaessa, sekä luiskan jyrkentyessä jokipenkereen stabiliteetti puolestaan pienenee (Osman & Thorne 1988). Varsinkin hienorakeisessa maassa jokien rannoilla voi aiheutua vyörymiä ja sortumia. Virtaava vesi kuluttaa uomaa, jolloin rantatörmä jyrkkenee. Kun rantatörmä jyrkkenee tarpeeksi, niin lopulta se menettää stabiliteettinsa ja sortuu.

Sortuma voi tapahtua kahdella tapaa, liukupintasortumana tai lohkeamalla. Liukupintasortumassa ranta-alue painuu alaspäin. Samanaikaisesti osa joen pohjaa

nousee ylöspäin. Jyrkkä ranta voi myös lohjeta/valua jokeen, jolloin ranta loivenee. Yleensä sortumat tapahtuvat nopean vedenlaskun jälkeen, kun maaperän huokosvedenpaine ei ehdi laskea. Tämä lisää jokitörmän kuormitusta ja aiheuttaa sortuman. Vyörymiä esiintyy varsinkin jokitörmillä, joiden maalaji on eroosioherkkää, kuten hienoa hiekkaa, hiekkaista silttiä tai silttistä hiekkaa. (Ollila 2002)

Joen rantojen muodonmuutoksissa keskeisiä tekijöitä ovat virtaavan veden joen törmään kohdistava voima, sekä törmän partikkeleiden painovoima. Joen törmän kaltevuus ja materiaali, uoman geometria, veden virtausnopeus. sekä törmän ja uoman kasvillisuus vaikuttavat törmän eroosioon (Knighton 1998). Törmän eroosioon vaikuttavat tekijät on koottu taulukkoon 5.

Kosteat törmät ovat kuiviin verraten helposti kuluvia. Toistuva törmän vedellä kyllästyminen ja kuivuminen, sekä jäätyminen ja sulaminen lisäävät ennestään törmän erodoituvuutta. Kostumisen ja kuivumisen vuorottainen vaihtelu on tärkeä seikka, koska se aiheuttaa maaperän laajenemista ja kutistumista. Tämä taas aikaansaa maaperään halkeilua, mikä edesauttaa törmää menettämään stabiliteettinsa. Halkeilleen maan jäätyessä jääkiilat leventävät halkeamia ennestään. (Knighton 1984)

Virtaava vesi vie materiaalia mukanaan suoraan joen törmän pinnasta, sekä uurtaa uoman pohjaa. Näiden seurauksena törmä jyrkkenee, kunnes se murtuu painovoiman vaikutuksesta (Knighton 1998). Tätä edesauttaa, jos koheesiomaan alla on kitkamaakerros, johon virtaava vesi pääsee käsiksi. Tämä kerros voi eroosion vaikutuksesta huuhtoutua koheesiomaan alta pois. Kuten edellisessä luvussa kuvattiin, niin hieno kitkamaa lähtee pienemmillä veden virtausnopeuksilla liikkeelle kuin koheesiomaa. Tämän seurauksena koheesiomaa jää ”tyhjän päälle” ja sortuu.

Uomassa kasvillisuus pienentää veden virtausnopeutta ja ehkäisee eroosiota. Joen törmässä vedenpinnan yläpuolella kasvillisuus sen sijaan vaikuttaa stabiliteettiin monella tapaa. Kasvien juurten rihmasto sitoo maanpintaa ja estää sen liikkumista. Lisäksi kasvillisuus ehkäisee rinteiden pinnan eroosiota. Puiden juuret taas tunkeutuvat syvemmälle maahan ja antavat näin tukea törmälle. Syvälle tunkeutuvilla juurilla on ankkuroiva vaikutus ja ne vastustavat maassa kulkevia liukupintoja. Toisaalta puut välittävät tuulen aiheuttamia jännityksiä maahan. Mekaanisten vaikutusten lisäksi kasvillisuudella on hydrologisia vaikutuksia. Juuristo imee maasta vettä, mikä pienentää

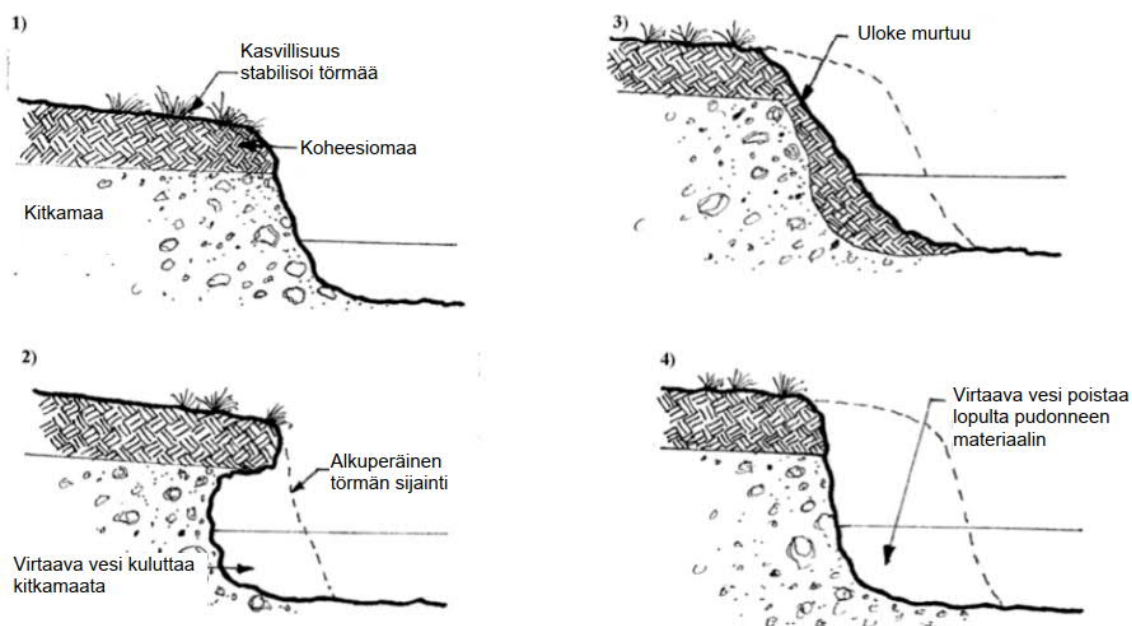
maan vesipitoisuutta. Tämä taas pienentää huokosvedenpainetta, minkä seurauksena maan lujuus kasvaa. (Coppin & Richards 1990)

Taulukko 5. Törmän eroosioon vaikuttavat tekijät (mukaillen Knightin 1984).

Tekijä	Olennaiset ominaisuudet
Virtausominaisuudet	Joen virtaaman suuruus, toistuvuus ja vaihtelevuus. Virtaaman ja leikkausjännityksen voimakkuus ja jakautuminen. Turbulenttisuuden taso.
Törmän materiaalin koostumus	Koko, raekoostumus, koheesio ja törmän sedimentin kerroksellisuus.
Ilmasto	Sateen määrä, voimakkuus ja kesto. Pakkasen toistuvuus ja kesto.
Pinnanalaiset olosuhteet	Suotopaine, sisäinen eroosio, maan kosteustaso ja huokosvedenpaine.
Uoman geometria	Leveys, syvyys ja uoman pituuskaltevuus. Törmän korkeus ja jyrkkyys. Mutkien kaarevuus.
Biologia	Kasvillisuuden juuriston tyyppi ja tiheys. Eläinten tekemät kolot.
Ihmisen aiheuttamat vaikutukset	Kaupungistuminen, maan kuivatus, veneily, törmää suojaavat rakenteet.

3.3 Kerrostuneen maarakenteen vaikutus

Joet, jotka virtaavat läpi kerroksellisen maaperän omaavat usein tietynlaisen rakenteen. Rakenteessa usein päällä on koheesiomaalaji (siltti/savi) ja tämän alle koheesioton maalaji (hiekkasora). Vedestä törmään aiheutuvien voimien vaikutuksesta alla oleva koheesioton maa erodoituu helpommin kuin päällä oleva koheesiomaa. Tämä johtaa siihen, että törmän yläosaan syntyy koheesiomaasta koostuvia ulokkeita. Törmän yläosa vetäytyy, kun tämä uloke murtuu (kuva 9). (Thorne & Tovey 1981)



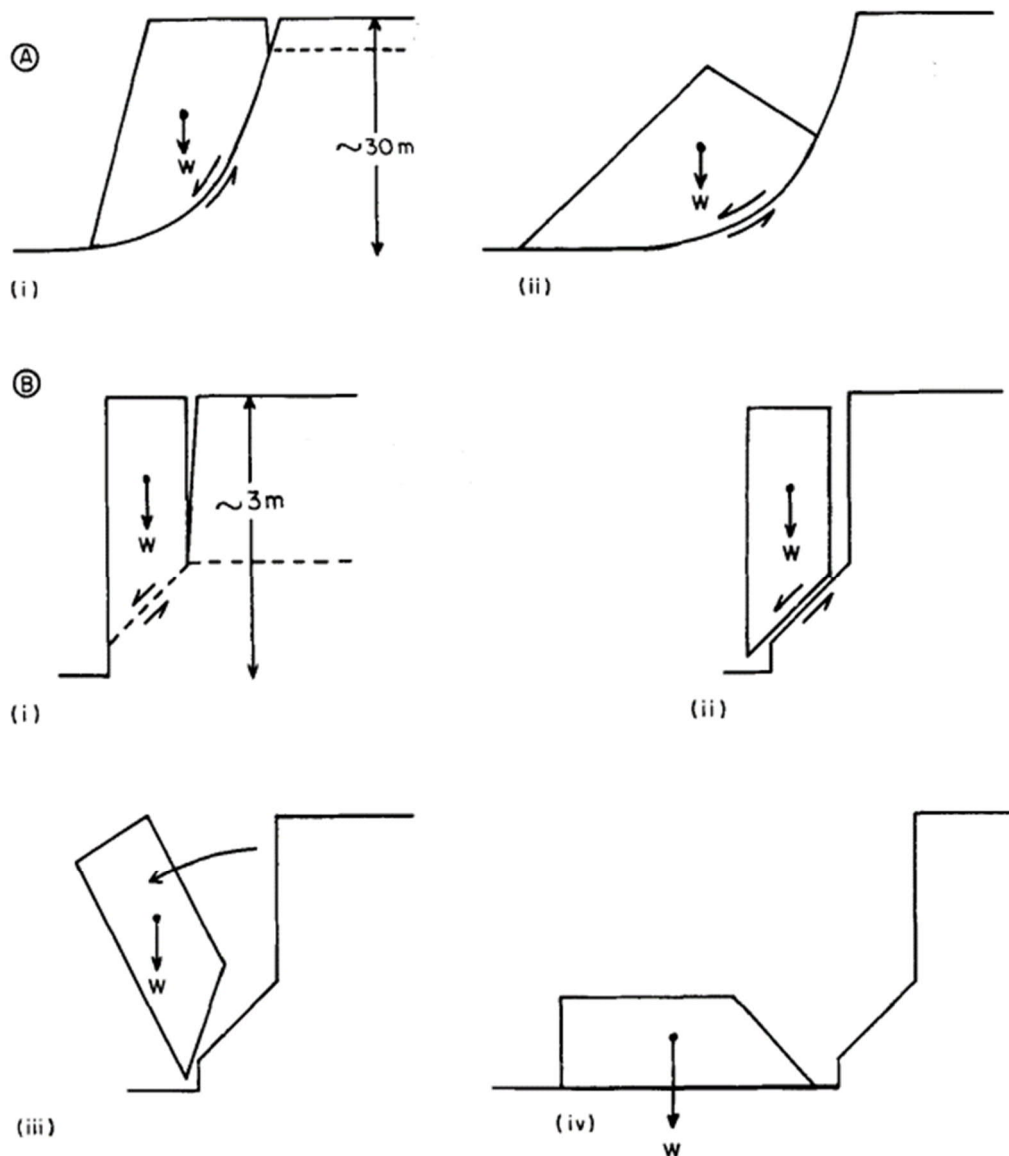
Kuva 9. Kerroksellisen jokitörmän murtuminen (mukaillen Johnson & Stypala 1993).

Jos huokosvedenpainetta ja ulkoisia voimia ei huomioida, niin koheesiottoman törmän stabiilitetti riippuu luiskan kaltevuudesta ja sisäisestä kitkasta. Tällöin murtuminen voi tapahtua, kun joko luiska jyrkkenee tai kitkakulma pienenee. Koheesiottomat maat ovat suhteellisen karkearakeisia ja yleisesti hyvin vettä johtavia, minkä takia niitä tarkastellessa huokosvedenpaine ei ole merkittävä. Vaikuttavia voimia ovat veden virtauksesta johtuvat nostevoima ja vastusvoima. Kuten jo kappaleessa 3.1 todettiin, niin raekoolla on suuri vaikutus maapartikkelin liikkeellelähdtöön. (Thorne & Tovey 1981)

Verrattuna törmän alaosan koheesiottomaan materiaaliin, koheesiota omaava törmän yläosa vastustaa suhteellisen hyvin veden virtauksen aiheuttamaa eroosiota. Koheesiomaassa liukupinta voi kuitenkin kulkea syvältä, verrattuna kitkamaahan (koheesioton), koska koheesiomaassa leikkausjännitys yleensä kasvaa nopeammin syvyyden suhteen kuin leikkauslujuus. Koheesiomaalajit eivät ole hyvin vettä johtavia, minkä takia huokosvedenpaine on merkittävä tekijä penkereen stabiilitetissa. (Thorne & Tovey 1981)

Jännitysten aikaansaama maan halkeilu pienentää voimassa olevia liukupintoja, sekä laskee penkereen stabiilitettia. Yleensä jännityshalkeamien suhde penkereen korkeuteen on kuitenkin pieni, mutta usein joentörmä tarkasteltaessa tilanne on toinen. Matalia

joentörmiä tarkasteltaessa jännityshalkeama voi ulottua merkittävälle osaa penkereen korkeudesta, tällöin törmän murtuminen tapahtuu ennemminkin leikkautumalla, kuin ympyrän muotoista liukupintaa pitkin. Kuvassa 10 on havainnollistettu tilannetta, esitetyissä tilanteissa koko pengerrin on koheesiomaata. A-kohdassa on esitetty korkea pengerrin, jossa halkeama on pieni suhteessa penkereen korkeuteen. Murtuma tapahtuu ympyrän muotoista liukupintaa pitkin. B-kohdassa on taas matala pengerrin, jossa halkea on suhteellisen korkea verrattuna itse penkereeseen. Murtuminen tapahtuu leikkautumalla ja leikkautunut osa pengertä kaatuu uomaan. (Thorne & Tovey 1981)



Kuva 10. Koheesiomaisen penkereen murtumistavat (mukaillen Johnson & Stypala 1993).

4 TUTKIMUSKOHTEIDEN KUVAUS

4.1 Porin alueen Kokemäenjoki

Kokemäenjoen vesistöalueen pinta-ala on 27 000 km². Vesistöalue on maamme viidenneksi suurin. Kokemäenjoki on tämän vesistöalueen laskujoki, se alkaa Vammalan Liekovedestä ja virtaa Huittisten, Kokemäen, Harjavallan, Nakkilan, Ulvilan ja Porin halki Selkämereen Pihlavanlahdelle (kuva 11). Joen pituus Liekoveden ja Porin Pihlavanlahden välillä on 110 km ja putoukskorkeus 57 m (Koskinen 2006). Kokemäen ja Harjavallan kohdalla joen kaltevuus on suuri, mutta kaltevuus pienenee alajuoksulle tultaessa. 37 kilometriä pitkällä alajuoksulla joen putous on vain 2,8 metriä (Rajala 2013).



Kuva 11. Kokemäenjoki lähtee Vammalasta ja laskee Huittisen, Kokemäen, Harjavallan, Nakkilan, Ulvilan ja Porin kautta Itämereen (sisältää Maanmittauslaitoksen Taustakarttasarjan 01/2021 aineistoa).

Pori on Suomen merkittävin tulvasuojelukohde. Porin kaupunki on rakennettu Kokemäenjoen ympärille. Alue on alavaa seutua, minkä seurauksena Kokemäenjoki on tulvinut ajoittain kaupunkiin. Tulvatilanteeseen vaikuttavat joen virtaama, jään ja hyyteen aiheuttama padotus, sekä meriveden korkeus. Pahimmat tulvatilanteet eivät rajoitu tiettyyn vuodenaikaan, ne vain syntyvät eri syistä eri vuodenaikoina. Pahimmat syystulvat johtuvat samaan aikaan korkealla olevasta merivedestä ja joen suuresta virtaamasta. Talvella tulvan aiheuttaa yleensä jokeen syntynyt hyydepato ja samanaikainen suuri virtaama. Keväällä tulvan aiheuttavat jokeen syntynyt jääpato ja suuri virtaama. (Porin kaupunki 2021)

Porin tulvasuojelu on osa Kokemäenjoen vesistön tulvariskien hallintaa. Tulvasuojelun puolesta vesistöä säännöstellään ja Kokemäenjoessa suoritetaan kunnossapitoruoppauksia. Lisäksi Porin alueelle on rakennettu ja kunnostettu tulvapatoja. Porin tulvavaara-alueen koko on noin 50 km² ja alueella on noin 5 000 asuntoa, sekä 15 000 asukasta. (Porin kaupunki 2021)

Kokemäenjoen keskivirtaama on 2000-luvulla ollut noin 238 m³/s. Keskimääräinen ylin virtaama on puolestaan ollut 600 m³/s ja alin virtaama noin 52 m³/s. Joen virtaamassa on paljon vaihtelua vuosittain, sekä vuorokausittain. Vuorokautinen vaihtelu aiheutuu voimalaitoksista. (Pirkanmaan ELY-keskus 2020)

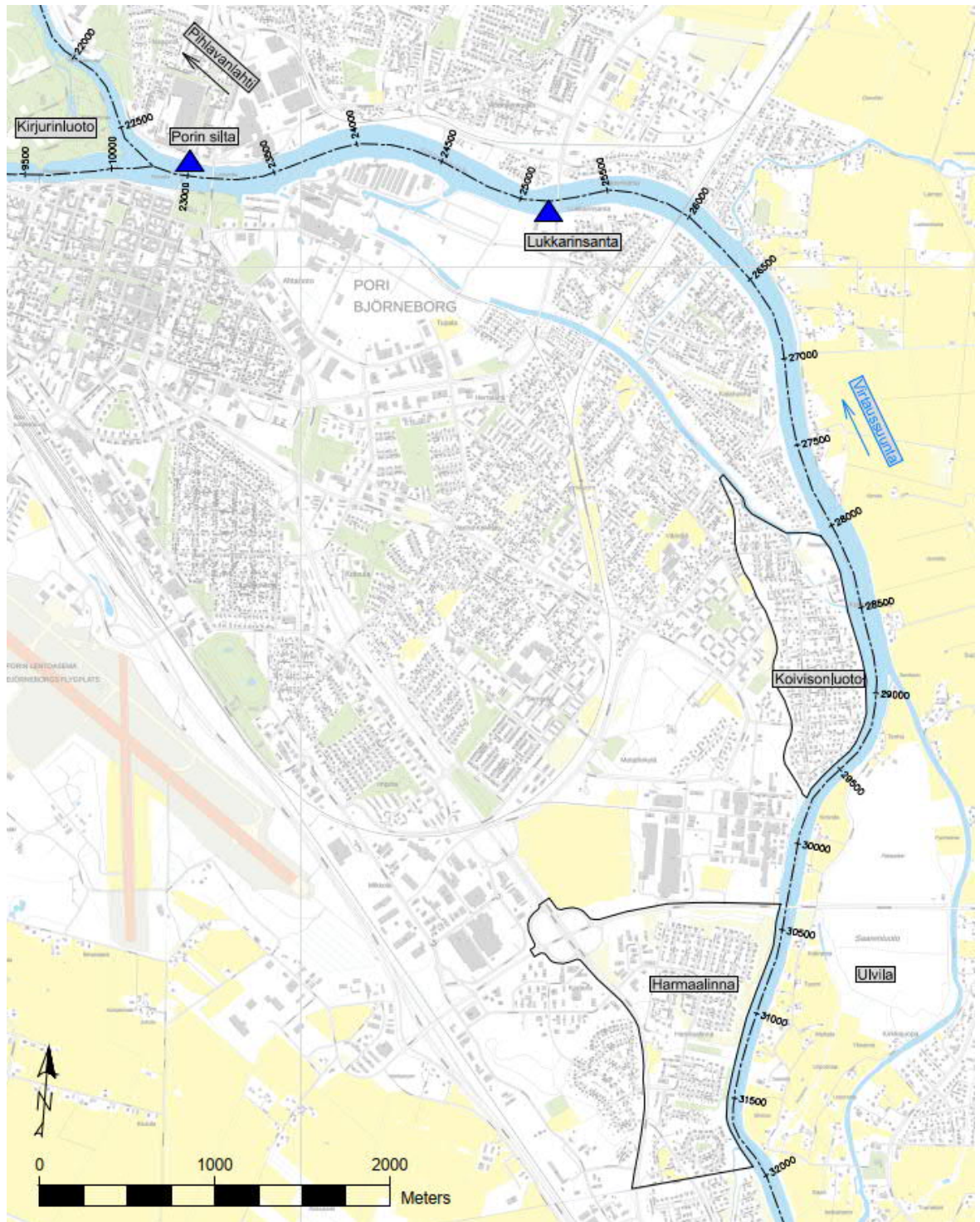
Kokemäenjoki on voimakkaasti säännöstelty. Sen putouuskorkeus on hyödynnetty lähes kokonaan jokialueen neljässä voimalaitoksessa. Voimalaitokset sijaitsevat Vammalassa (Tyrvään voimalaitos ja Äetsän voimalaitos) ja Kokemäellä (Kolsin voimalaitos ja Harjavallan voimalaitos). Harjavallan voimalaitos on näistä viimeisimpänä joen virtaussuuntaan nähden. Nämä kaikki voimalaitokset harjoittavat vuorokausi- ja viikkosäännöstelyä. Säännöstelyllä pyritään tasaamaan sähköenergian kulutushuippuja, mutta säännöstelyssä otetaan myös huomioon tulvien ehkäiseminen jättämällä yläpuolisiin järvioltaisiin säätövaraa kevät- ja hyydetulvien varalta. Hyydetulvia ehkäistään säännöstelyllä siten, että virtaamaa pienennetään, kun on riittävän kylmä, mikä edistää jääkannen muodostumista. Tätä kutsutaan jäähdytysajoksi. (Pirkanmaan ELY-keskus 2020)

Keskivedenkorkeus MW, tarkoittaa tietyn havaintojakson keskimääräistä vedenkorkeutta. Porin vanhan sillan havaintopaikalla MW on ollut vuosien 2005-2010

välillä +0,46 N2000-korkeusjärjestelmässä. Tässä työssä puhuttaessa korkeustasoista käytetään N2000-korkeusjärjestelmää. Lukkarinsannan havaintoasemalla puolestaan MW on ollut vuosien 2004-2010 välisellä ajalla +0,55 (SYKE 2021). Näiden perusteella keskivedenkorkeudeksi valitaan +0,5. Muita työssä käytettäviä vedenkorkeuksia:

- keskimääräinen ylivedenkorkeus MHW +1,7,
- keskimääräinen alivedenkorkeus MNW -0,1 ja
- alivedenkorkeus NW -0,4.

Havaintoasemien sijainti on merkitty kuvaan 12 sinisillä kolmioilla. Lisäksi kuvaan on rajattu tutkimusalueet.



Kuva 12. Tutkimusalueet rajattu kartalla, sekä vedenkorkeuden havaintoasemat merkitty sinisillä kolmioilla. Kartalla joen mittalinja ja paalutus, joka pienenee virtaussuuntaan nähden alajuoksulle. (sisältää Maanmittauslaitoksen Taustakarttasarjan 01/2021 aineistoa)

Porin alueen Kokemäenjoen osuudella maapeitteen paksuus on keskimäärin noin 30-50 m. Peruskallion päällä on noin 5-30 m paksu pohjamoreenikerros. Sen päällä on lajittuneita sora- ja hiekkakerroksia noin 10 m. Päällimmäisenä on noin 6-8 m oleva savikerros, paksuimmillaan savikerros on jopa 35 m. Paksuimmat savikerrokset sijoittuvat Porin alueella Kokemäenjoen kohdalle, entisen merenlahden paikalle. (Kinnunen & Lindfors 2000)

Tutkimusalueella on viisi nimettyä maaperämuodostumaa. Muodostumat korkeustason mukaan alhaalta ylöspäin ovat: Toukari-, Ulasoori-, Hevosluoto-, Lanajuopa- ja Säikkämuodostuma. Vanhin muodostuma Toukari, alkoi kerrostua Veiksel-jäätikön perääntymisvaiheessa 10 800 vuotta sitten. Toukari-muodostuma koostuu soran, hiekan, siltin ja saven ylöspäin hienonevista kerroksista. Toukarin päällä oleva Ulasoori-muodostuma on savea. Hevosluoto-muodostuma koostuu savesta ja siltistä. Se on muodostunut, kun Kokemäenjoen suistoon kuljettama savi ja siltti on kerrostunut matalaan veteen. Lanajuopa-muodostuma koostuu karkeasta ja hienosta hiekasta. Hiekka kulkeutuu suspensiossa, kunnes virtauksen hidastuessa se laskeutuu joen pohjalle. Päällimmäinen Säikkä-muodostuma koostuu raekooltaan karkeasta siltistä keskikarkeaan hiekkaan olevasta materiaalista. Se on muodostunut joen tulviessa normaalisti kuivana oleville alueille, kun tulviva vesi on kuljettanut sedimenttiä. (Niinikoski 2011)

Niinikoski (2011) arvioi tutkimuksessaan, että vuosittain Pihlavanlahdelle kerrostuu noin 150 000 m³ Kokemäenjoen kuljettamaa sedimenttiä. Yksi tutkimuksen keskeisimmistä tuloksista oli havainto siitä, kuinka merkittävästi eroosio kasvaa uoman poikkileikkauspinta-alan ollessa alle 450 m². Lisäksi samassa tutkimuksessa havaittiin, että Hevosluoto- ja Ulosaari-muodostelmien savet vastustavat virtauksen aiheuttamaa eroosiota muita maaperämuodostumia paremmin. Kun nämä kerrokset kuluvat pois ja niiden alta paljastuu eroosiolle herkempi Toukari-muodostuma, niin eroosio kiihtyy entisestään. Tähän syynä on aikaisemmin kuvattu raekoon merkitys partikkelin eroosioherkkyyteen.

Suuripiirteisesti kuvattuna Harjavallan voimalaitoksen jälkeen Kokemäenjoen uoma on syvä ja kapea Porin alueelle saakka. Tältä osin jokea tapahtuu eroosiota. Ennen kuin joki haarautuu Kirjurinluodon kohdalla, Kokemäenjoki levenee ja sen myötä veden virtausnopeus hidastuu. Tässä kohtaa erodoitunut aines alkaa sedimentoitua joen pohjaan.

Kirjurinluodosta suistoon mentäessä eroosiota ei enää pääasiallisesti tapahdu. Suurin osa Kokemäenjoen kuljettamasta sedimentistä kerrostuu kuitenkin vasta Pihlavanlahdelle.

Kokemäenjoen Porin alueella on tapahtunut useita joen vedenpinnan yläpuolisen törmän sortumia, sekä vedenpinnan alapuolisen joenpohjan sortumia. Sortumiset johtuvat pääasiallisesti eroosion aiheuttamasta joen törmän ja uoman jyrkkenemisestä. Vedenpinnan alapuoliset sortumat on voitu havaita eri vuosina tehtyjä joen pohjan luotauksia tarkastelemalla. Porin alueella Kokemäenjoen rannan välittömässä läheisyydessä on asutusta, joten tilanne on vaarallinen.

Rantatörmien sortumia on tapahtunut Kokemäenjoella myös Porin naapurikunnissa Nakkilassa ja Ulvilassa. Nakkilan ja Ulvilan alueilla on tapahtunut useita joen rantatörmän sortumisia. Näillä alueilla on jouduttu lunastamaan ja purkamaan rakennettuja taloja, sekä sortumat ovat vaurioittaneet maanteitä (Koskinen 2006). Tässä työssä tutkittavat alueet sijoittuvat Kokemäenjoen länsipuolelle, joen itärannan stabiileettia ei tässä työssä tutkita.

4.2 Koivistonluoto

Tarkasteltava Koivistonluoto sijaitsee Itä-Porissa, Kokemäenjoen länsipuolella (kuva 12). Koivistonluoto on pääasiassa pientaloaluetta, jossa taloja on rakennettu aivan joen rannan läheisyyteen, lukuun ottamatta kaupunginosan pohjoisinta osaa, Tiimanninluotoa. Tiimanninluotoon on suunniteltu rakennettavaksi uusi rivitaloyhtiö, jonka vuoksi alueen vakavuustarkastelu on ajankohtainen. Koivistonluodon alue on korkeustasoltaan sen verran korkealla, että se on tulvasuojelun ulkopuolella, eli alueelle ei ole rakennettu tulvapatoja.

Tarkastelun perusteella joen törmä on jyrkimmillään Koivistonluodon eteläisessä osassa ja pohjoisessa Tiimanninluodon alueella. Rannan jyrkimmät osuudet on merkitty punaisella kuvaan 13. Koivistonluodon keskiosassa joen törmä on loiva edellä mainittuihin alueisiin verrattuna. Joen törmän yläreunan korkeustaso Koivistonluodon alueella vaihtelee välillä +4,5...+2,5. Liitteessä 1 on esitetty poikkileikkauksia joesta sadan metrin välein. Poikkileikkauksista voi nähdä selvän eron törmän geometriassa eri alueiden suhteen. Koivistonluodossa joen rantaa on paikoin parannettu louheverhouksella. Louheverhouksella kunnostetut rannat on merkitty vihreällä värillä

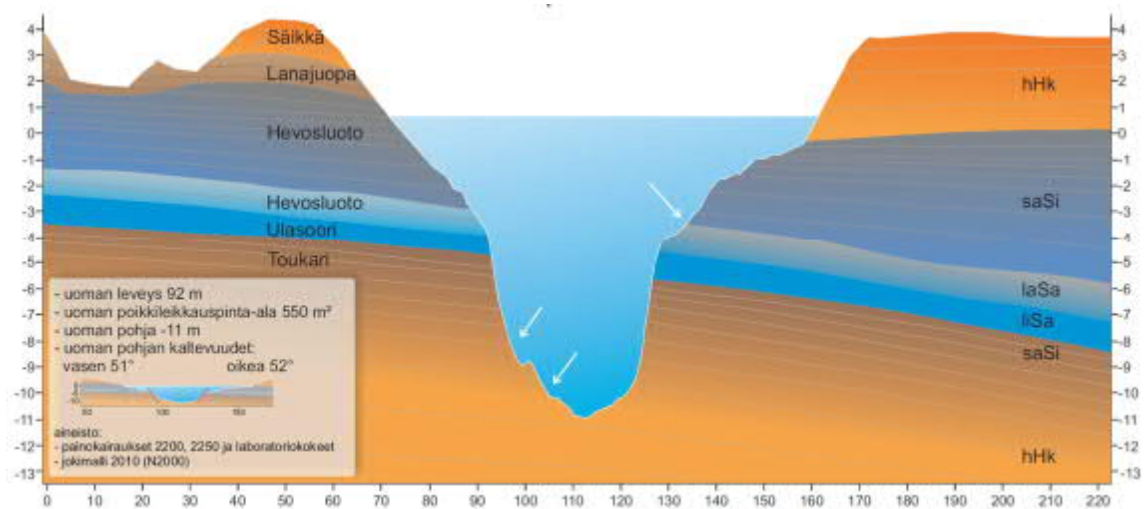
kuvaan 13. Kokemäenjoen Koivistonluodon osuudella joen rannalla on hyvin kapea puistoalue. Joen törmässä kasvaa puita, joista osa on kallistunut jokea kohti.

Joен uoman ja törmän geometrian tarkastelun perusteella ongelmallisin kohta Koivistonluodossa on sen eteläisessä osassa, missä Kokemäenjoki on kapeimmillaan. Kyseisessä kohdassa joen törmä on jyrkkä, minkä lisäksi talot ovat hyvin lähellä rantaa. Alueelta ei saatu tarkkaa tietoa rakennusten perustamistavoista. Perustamistavat pystytettiin selvittämään muutamasta rakennuksesta, jotka eivät sijainneet tarkastelun ongelmallisimmassa kohdassa. Koivistonluodon eteläisessä osassa joen uoma on paikoin hyvin syvä, syvimmillään jopa tasolla -12,2. Joen uoma on varsinkin syvänteiden kohdalla hyvin jyrkkä.



Kuva 13. Koivistonluoto. Kartalla joen mittalinja ja jokipaalu numerointi 100 metrin välein. Vihreä kuvaa louheverhouksella kunnostettuja rantoja. Punainen kuvaa joen törmän jyrkimpiä kohtia. (sisältää Maanmittauslaitoksen Peruskarttarasteri 01/2021 aineistoa)

Koivistonluodon kohdalla uoman pohja kulkee nykyisellään paikoin Toukari-muodostuman kitkamaalajeissa. Eroosio on kuluttanut Toukari-muodostuman yläpuolelta paremmin eroosiota vastustavat Hevosluoto- ja Ulosaari-muodostuman koheesiomaat. Koivistonluodon kohdalla Toukari-muodostuma on suhteellisen lähellä maanpintaa. Niinikoski (2011) ja Tervala (2016) totesivat tutkimuksissaan, että eroosio on kiihtynyt voimakkaasti alueilla, joissa Toukari-muodostuman kitkamaalajit ovat paljastuneet. Näin on tapahtunut Koivistonluodossa. Kuva 14 havainnollistaa tilannetta. Kuvassa nuolet osoittavat kohtia, joissa on havaittu liukupintasortumia.

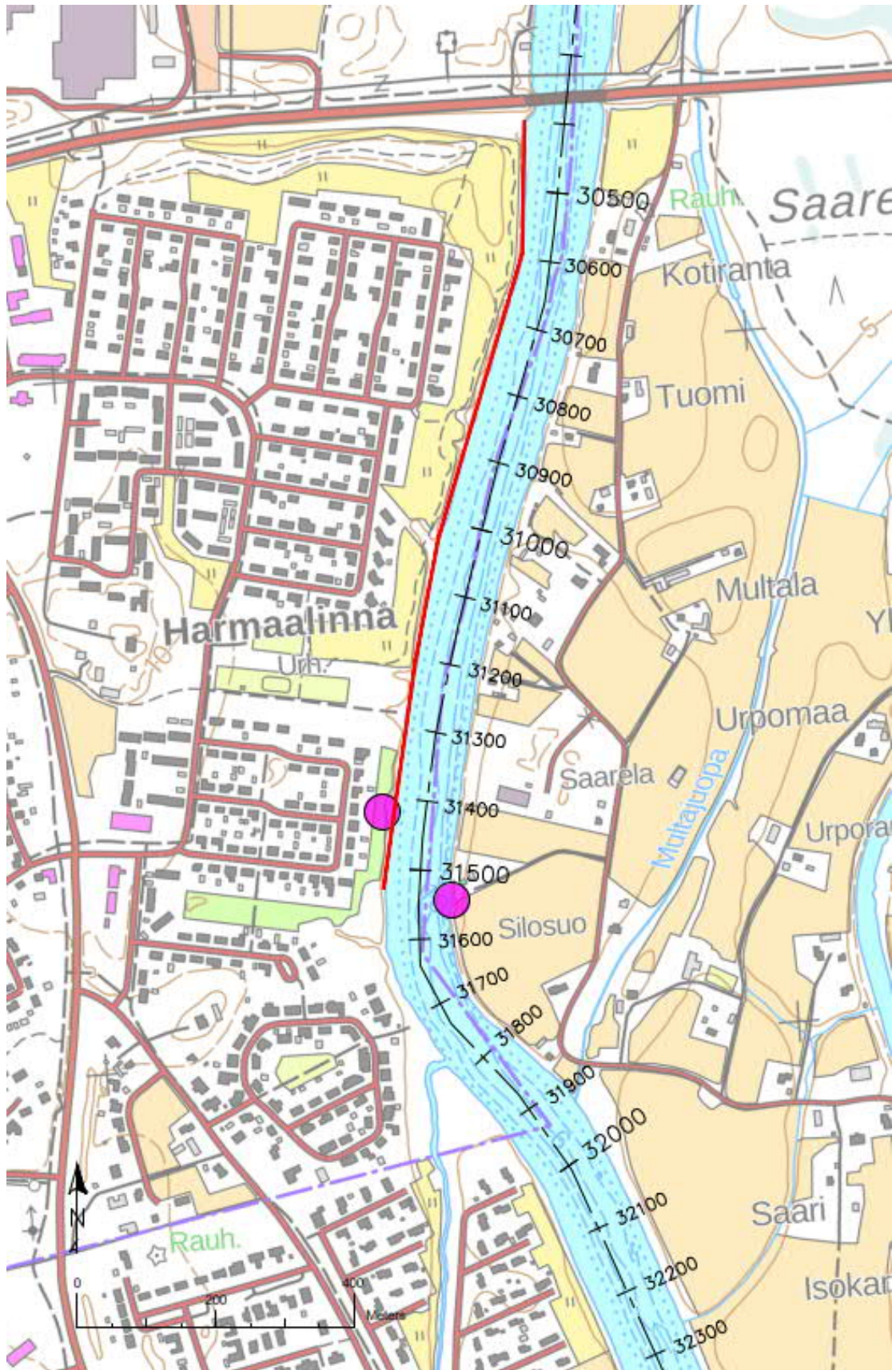


Kuva 14. Kokemäenjoen poikkileikkaus paalun 29 700 kohdalta. Liukupintasortumut on esitetty nuolilla (mukaillen Niinikoski 2011).

Ketosen (2010) mukaan Koivistonluodossa stabiliteetti on nykyisellään huono. Tutkimuksessa todettiin, että alueella on riski sortumille, mikäli riittävän epäsuotuisat olosuhteet stabiliteetin kannalta saavutetaan, nopea vedenpinnan lasku voi esimerkiksi aiheuttaa sortuman. Tällöin rannan läheisyydessä sijaitsevat talot ovat vaarassa. Rantojen vakavuus on todettu huonoksi, varsinkin jyrkissä kohdissa. Tilanne voi aiheuttaa vaaran ihmishengelle.

4.3 Harmaalinna

Tarkasteltava Harmaalinna sijaitsee Itä-Porissa, Koivistonluodosta etelään (kuva 12). Harmaalinna on pääasiassa pientaloaluetta, jossa talojen ja joen välissä on noin 50 metriä leveä puistoalue, lukuun ottomatta kaupunginosan eteläisintä osaa. Eteläisimmässä osassa on taloja lähempänä rantaa, mutta kyseisessä kohtaa joen törmä on loivempi mitä muualla Harmaalinna. Alueelta pystyttiin selvittämään vain yhden rakennuksen perustamistapa, kyseinen rakennus oli perustettu paaluille. Harmaalinna on korkeustasonsa puolesta tulvasuojelun ulkopuolella, eli alueelle ei ole rakennettu tulvapatoja.



Kuva 15. Harmaalinna. Kartalla joen mittalinja ja jokipaalu numerointi 100 metrin välein. Punainen väri kuvaa joen törmän jyrkintä aluetta. Tapahtuneet sortumat merkitty ympyröillä. (sisältää Maanmittauslaitoksen Peruskarttarasteri 01/2021 aineistoa)

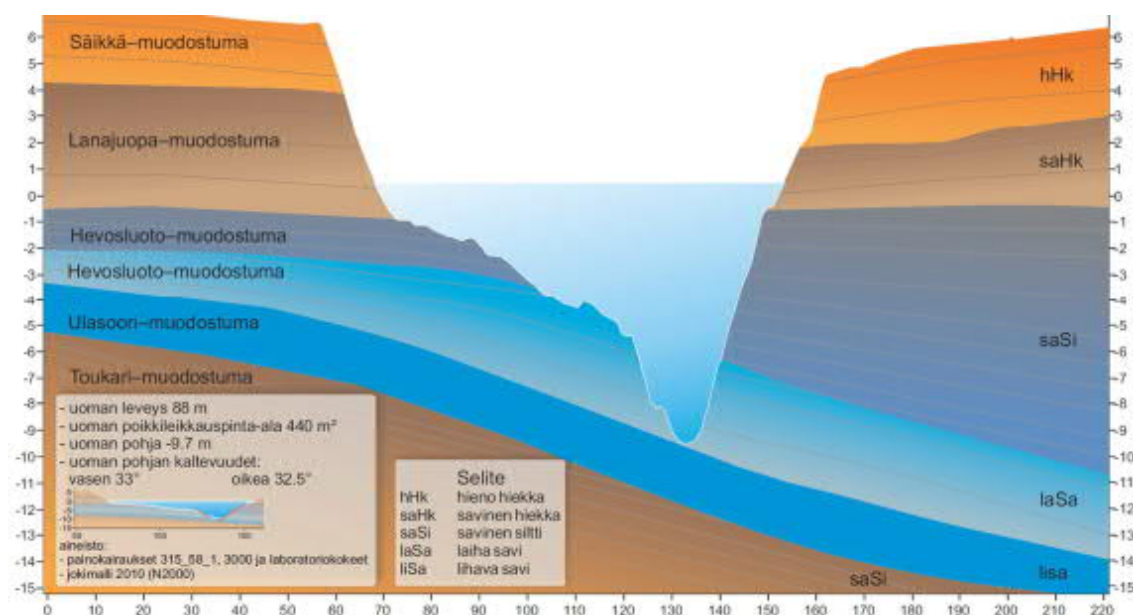
Harmaalinnan alueella joen törmä on jyrkkä, lukuun ottamatta alueen eteläistä osaa. Joen törmän yläreunan keskimääräinen taso Harmaalinnan alueella on noin +5,5. Törmän kaltevuus vaihtelee suhdelukuna ilmaistuna välillä 1:1 – 1:2. Kokemäenjoen uoman vasen reuna on Harmaalinnan kohdalla loiva ja matala. Syvänneura kulkee keskimäärin 50 metrin etäisyydellä rannasta. Kokemäenjoen uoma on jyrkempi Ulvilan puolella. Joen keskimääräinen poikkileikkaus on esitetty kuvassa 16. Keskimääräinen poikkileikkaus on paalulta 31 000, mutta se kuvastaa alueen yleistä tilannetta hyvin selkeästi.



Kuva 16. Joen keskimääräinen poikkileikkaus Harmaalinnan alueella. Harmaalinna uoman vasemmalla puolen ja Ulvila oikealla.

Joen törmässä kasvaa kauttaaltaan tiheästi puita ja pienempää kasvillisuutta. Osa joen uoman välittömässä läheisyydessä kasvavista puista on kallistunut joen suuntaan. Kuten jo aikaisemmin todettu, niin puusto ja kasvillisuus ehkäisevät törmän sortumaa, sekä eroosiota. Porin kaupungin rakennusjärjestyksessä (2019) sanotaan, että rannan sortumisen, sekä eroosion välttämiseksi rakennuspaikalla tulee ranta-alueen kasvillisuus pääosin säilyttää, ainoastaan harventaminen on sallittua.

Harmaalinnan kohdalla Toukari-muodostuma on syvemmällä mitä Koivistonluodossa. Uoman pohja ei ole vielä läpäissyt Hevosluoto- ja Ulosaari-muodostumien koheesiomaakerroksia (kuva 17). Uoman syvimmät kohdat ovat Harmaalinnan pohjois- ja eteläpäässä, syvänteet ovat syvimmillään tasolla -12 (N2000).



Kuva 17. Kokemäenjoen poikkileikkaus paalun 31 500 kohdalta (Niinikoski 2011).

Kuvaan 15 on merkitty ympyröillä kaksi kohtaa, joissa on tapahtunut joen törmän sortuma. Harmaalinnan puoleinen (joen länsipuoleinen) sortuma on tapahtunut joulukuussa 2019. Sortuman kohdalla oleva tontti on noin 30 metrin päässä joen rannasta ja tontilla sijaitsevan asuinrakennuksen etäisyys on puolestaan noin 50 metriä. Sortuma sijaitsee puistoalueella ja sen välittömässä läheisyydessä kulkee ulkoilupolku.

Ulvilan puoleinen (joen itäpuoleinen) sortuma on tapahtunut vuonna 2013. Sortuma oli hyvin laaja, joen törmä sortui noin 45 metrin matkalta ja se vei mukanaan tontilla olleen piharakennuksen. Sortuman todettiin johtuvan joen eroosiosta, eikä alueella todettu lisäsortuman vaaraa. Näin ollen lähialueen rakennuksia ei jouduttu asettamaan käyttökieltoon (Laakso 2014). Sortumaa edelsi nopea vedenpinnan lasku. Joen vedenpinta laski ennen sortumaa kahdessa viikossa 90 senttimetriä. Kyseisestä sortumasta lisää luvuissa 5.1.2 ja 6.3.

5 STABILITEETILASKENNAN LÄHTÖKOHDAT

5.1 Luotaukset

Joen uomassa tapahtuvalla eroosiolla on merkittävä vaikutus törmän stabiliteetin suhteen. Tämän takia ennen laskentapoikkileikkauksien määrittystä on syytä tarkastella, miten joessa tapahtuu eroosiota ja miten se kehittyy. Tätä varten lähtötietoina on vuosina 2010 ja 2014 tehdyt viistokaikuluotaukset. Nämä luotaukset kattavat tutkimusalueet kokonaan. Lisäksi tammikuussa 2021 on tehty luotaus. Viimeisin luotaus on tehty rajatuilta alueilta Kokemäenjoesta Koivistonluodon ja Harmaalinnan alueilta, eikä se kata koko jokiosuutta. Vuosien 2010 ja 2014 luotaukset on tehty eri kalustolla kuin vuoden 2021 luotaus. Uusin luotaus ei ole yhtä tarkka kuin aiemmat. Vuosien 2010 ja 2014 luotauksista saadaan muodostettua uomasta malli 1x1 metrin ruudukolla, eli mitattujen pisteiden etäisyys on metri. Vuoden 2021 luotauksen mitattujen pisteiden keskimääräinen etäisyys on noin 8 metriä.

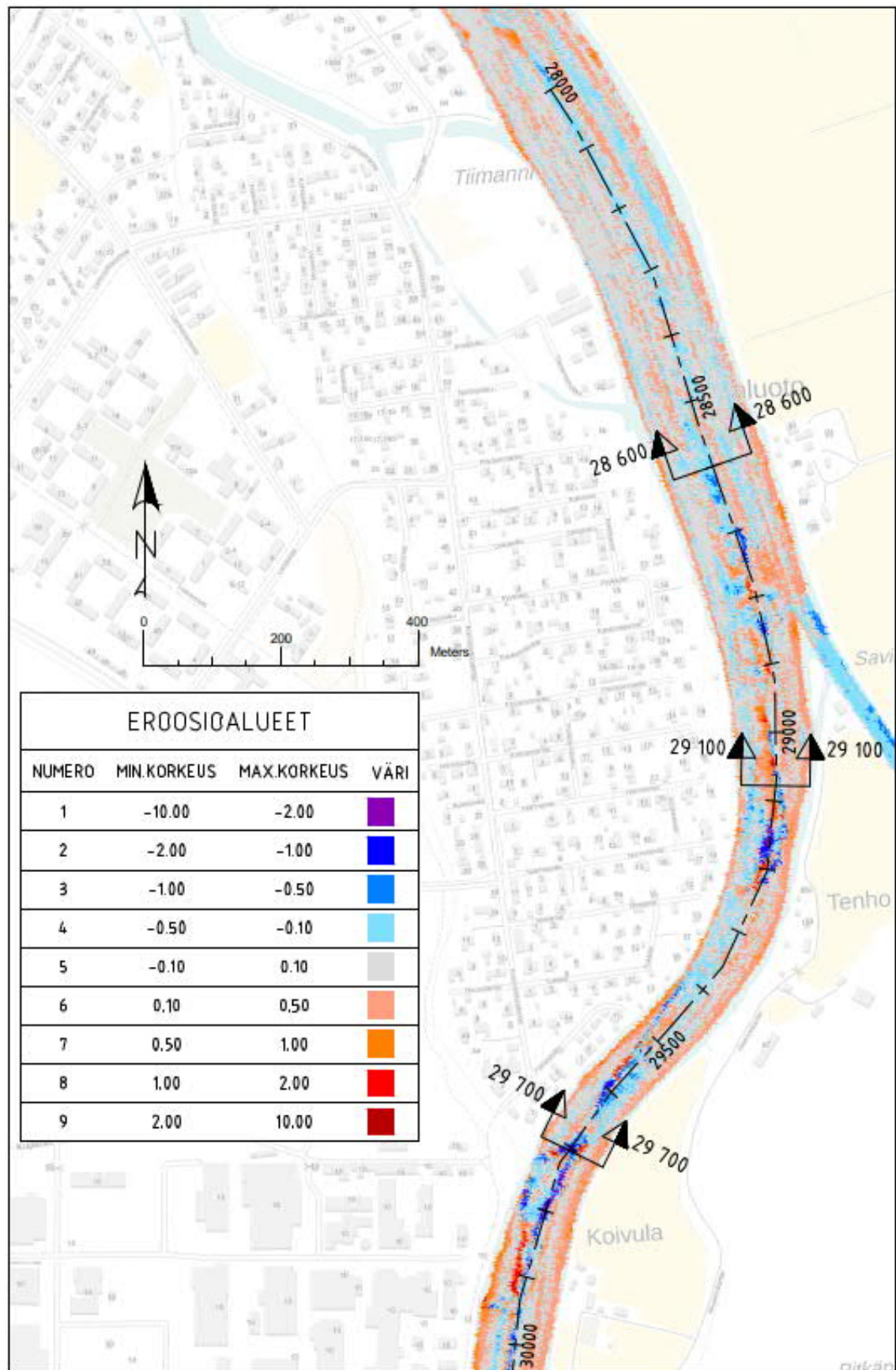
Luotaustulosten perusteella tehtyjä pintamalleja vertaamalla voidaan selvittää alueita, missä tapahtuu eroosiota ja missä sedimentaatiota. Tämän lisäksi luotauksia tarkastelemalla on mahdollista selvittää, onko uomassa tapahtunut vedenalaisia sortumia ajan kuluessa. Kuvat 18 ja 20 havainnollistavat vuosina 2010 ja 2014 suoritettujen luotauksien välisellä ajalla tapahtuneita muutoksia joen uomassa. Kuvissa värit kertovat kuinka paljon eroosiota tai sedimentaatio on tapahtunut luotauksien välissä. Negatiivisia arvoja kuvaavat värit kertovat kuinka paljon eroosiota kyseisessä pisteessä on tapahtunut ja positiiviset arvot puolestaan ilmaisevat sedimentaatiota. Korkeuden muutokset (kuvat 18 ja 20) tarkoittavat pystysuoraa korkeuden muutosta uoman pohjassa vuosien 2010 ja 2014 luotausten välillä. Kuviin on lisäksi merkitty kohdat, joista on tehty poikkileikkaukset (kuvat 19 ja 21) havainnollistamaan uomassa tapahtuvia muutoksia. Poikkileikkauksia käsitellään kappaleissa 5.1.1 ja 5.1.2.

Kuvissa 19 ja 21 esitettyjen poikkileikkausten lisäksi liitteessä 1 on uoman poikkileikkaukset sadan metrin välein tutkittavilta alueilta. Liitteen poikkileikkauksissa on esitetty uoman lisäksi tutkimusalueen puoleinen joen törmä. Maanpinnan malli perustuu vuosina 2008 ja 2019 tehtyihin laserkeilauksiin. Kuvissa 19 ja 21 esitetyissä poikkileikkauksissa vuonna 2021 tehdyn luotauksen mukainen uoman pohja on mukana

ainoastaan leikkauksissa, joissa luotausaineisto on tarkimmillaan. Liitteessä olevissa leikkauksissa vuoden 2021 luotauksen mukainen pohja on esitetty, mutta sen tarkkuus on heikompi.

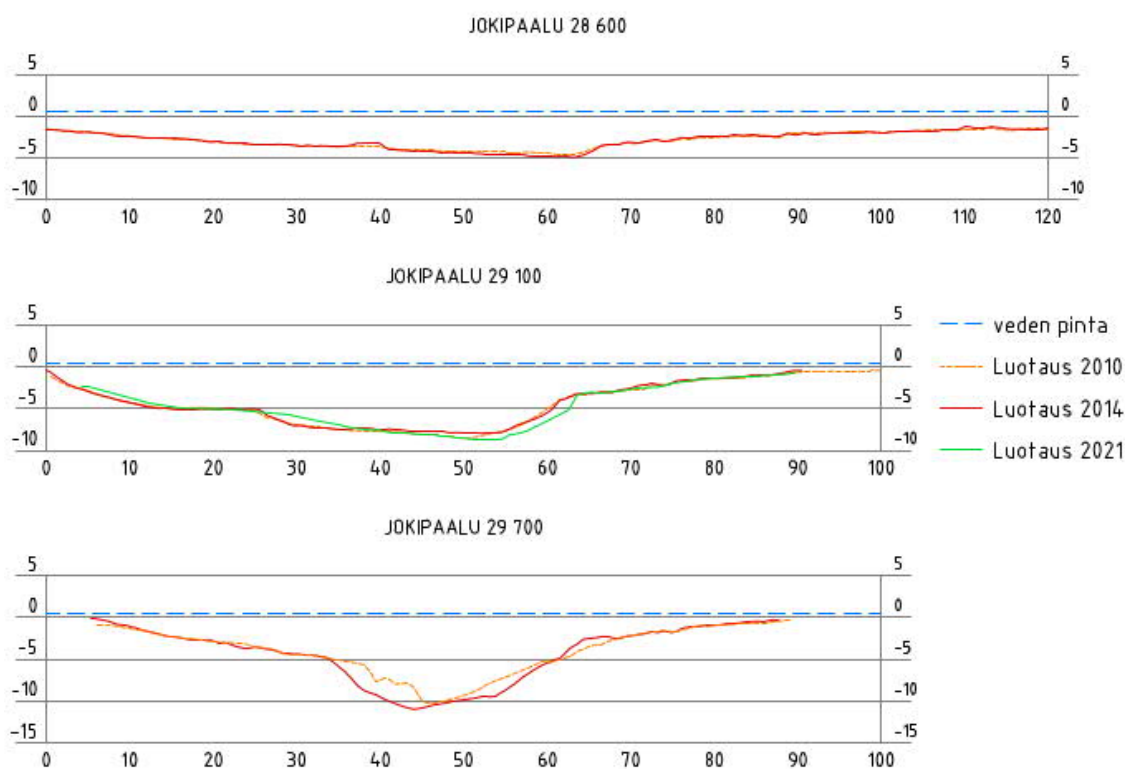
5.1.1 Koivistonluoto

Tarkasteltavalta Koivistonluodon alueelta voidaan luotauskuvien perusteella havaita, että eroosiota tapahtuu uoman keskellä (kuva 18). Eroosioalueet seuraavat uoman syvänneuraa. Koivistonluodon alueella eroosio on voimakkainta joen kapeimmalla osuudella, joen kaarteessa paaluvälillä 29 000 – 30 000. Tällä paaluvälillä joki on syvimmillään. Tervala (2016) määritteli työssään kyseisen jokiosuuden eroosioalueeksi. Kyseisessä työssä eroosioalueiksi luokiteltiin alueet, joissa tapahtuu eroosiota 0,05-0,10 metriä vuodessa.



Kuva 18. Eroosio ja sedimentaatio Kokemäenjoessa Koivistonluodon alueella. Värit kuvaavat pystysuoraa korkeuden muutosta uoman pohjassa vuosien 2010 ja 2014 luotausten välillä. (sisältää Maanmittauslaitoksen Taustakarttasarjan 01/2021 aineistoa)

Koivistonluodon alueella joen syvin kohta on noin -12,2 ja se sijaitsee kuvassa 18 näkyvän voimakkaan eroosion alueella jokipaalun 29 700 kohdalla. Syvimmällä kohdalla eroosio etenee vuosien 2010 ja 2014 luotausten perusteella leveyssuuntaisesti, eikä se enää näytä syventävän ennestään syvimpiä alueita (kuva 19). Jokipaalun 29 700 poikkileikkauksesta nähdään, että eroosio etenee kohti Koivistonluodon puoleista rantaa, mikä on uhkatekijä rannan stabiliteetin kannalta. Eroosio on ollut voimakkaampaa uoman ulkokaarteessa, joka on jo ennestään jyrkempi. Kuvasta 14 joka on samasta kohtaa nähdään, kuinka uoman pohja kulkee jo Toukari-muodostuman kitkamaassa. Paalun 29 100 poikkileikkauksesta huomataan, että myös tässä uoman syvin kohta on ulkokaarteessa, minne myös eroosio painottuu. Joen kaarteessa paaluvälillä 29 000 – 30 000 joen voimakkaaseen eroosion vaikuttavat uoman pieni poikkileikkauspinta-ala, uoman pohjan sijainti kitkamaassa ja joen vaakageometria.



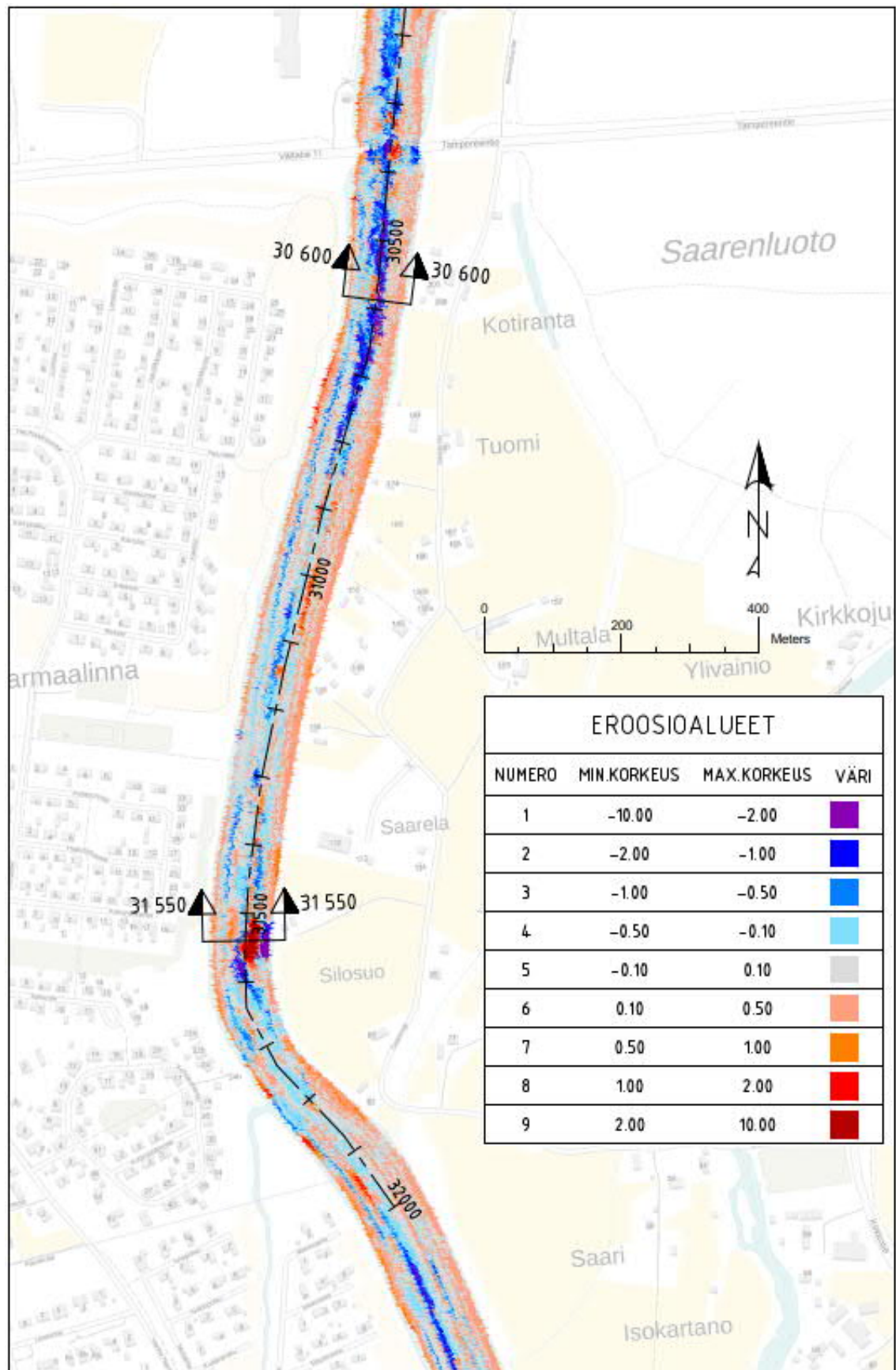
Kuva 19. Uoman poikkileikkauksia Koivistonluodon alueelta jokipaalujen 28 600, 29 100 ja 29 700 kohdilta.

Paalulta 28 600 oleva poikkileikkaus on jo Kokemäenjoen leveämmältä osuudelta. Poikkileikkauksessa ei havaita luotausten perusteella merkittävää eroosiota, eikä

sedimentaatiota. Tähän vaikuttavat uoman suuri poikkileikkauspinta-ala, uoman geometria ja uoman pohjan sijainti koheesiomaassa. Uoman pohja ei yllä Toukari-muodostumaan saakka. Kuten luvussa 3 kerrottiin, niin uoman poikkileikkauksen pinta-ala vaikuttaa veden virtausnopeuteen, mikä puolestaan vaikuttaa partikkelien eroosioherkkyyteen. Toukari-muodostuman kitkamaa erodoituu pienemmillä virtausnopeuksilla mitä Hevosluoto- ja Ulosaari-muodostumien koheesiomaat.

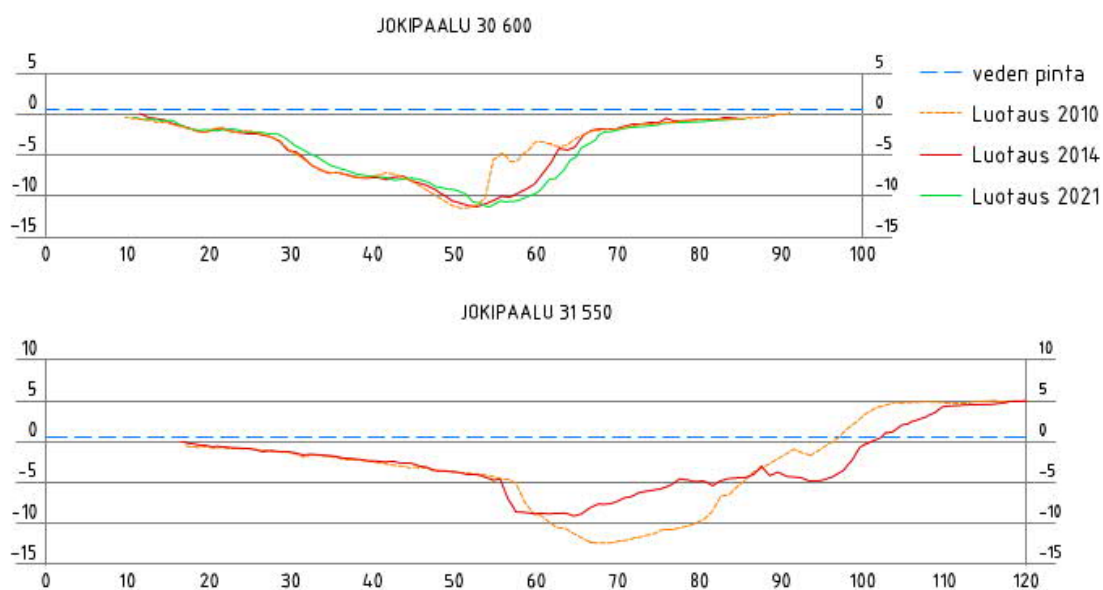
5.1.2 Harmaalinna

Kokemäenjoen Harmaalinnan osuudella tapahtuu eroosiota. Kuvan 20 perusteella voidaan havaita, että eroosio on voimakkainta uoman keskellä, joen syvimmällä alueella. Tämä johtunee siitä, että suurimmat veden virtausnopeudet keskittyvät uoman syvimpään kohtaan. Uoman reunoilla matalammissa kohdissa virtausnopeutta hidastavat pohjasta aiheutuva kitka ja kasvillisuus. Kuvasta voidaan myös havaita, että eroosio on voimakkainta Harmaalinnan pohjoisessa osassa. Tervala (2016) määritteli työssään kyseisen osan Kokemäenjoesta voimakkaan eroosion alueeksi. Voimakkaan eroosion määritelmä oli, että alueella tapahtuu suuremmalla pinta-alalla ja pituudelta yli 0,1 metriä eroosiota vuodessa.



Kuva 20. Eroosio ja sedimentaatio Kokemäenjoessa Harmaalinna-alueella. Värit kuvaavat pystysuoraa korkeuden muutosta uoman pohjassa vuosien 2010 ja 2014 luotausten välillä. (sisältää Maanmittauslaitoksen Taustakarttasarjan 01/2021 aineistoa)

Paalun 30 600 poikkileikkaus on voimakkaan eroosion alueelta. Poikkileikkauksesta käy ilmi huomattava ero vuoden 2010 ja 2014 luotausten välillä (kuva 21). Suurimmillaan pystysuuntainen ero on 5 metriä. Näin suuri ero johtunee oikeanpuoleisessa luiskassa tapahtuneesta vedenalaisesta sortumasta. Samaa poikkileikkausta tarkasteltaessa huomataan, että uoman pohjan ero ei ole aivan yhtä suuri vuosien 2014 ja 2021 luotausten välillä, mutta aikavälillä on tapahtunut huomattavaa eroosiota. Vuoteen 2021 tultaessa uoma on kuitenkin jyrkentynyt ja uusi sortuma on todennäköinen tilanteen kehittyessä edelleen.



Kuva 21. Uoman poikkileikkauksia Harmaalinna-alueelta.

Paalun 31 550 poikkileikkaukseen on otettu mukaan myös maanpinta joen oikealta puolen. 2010 vuoden luotaus on yhdistetty vuonna 2008 tehtyyn laserkeilaukseen ja vuoden 2014 luotaus on yhdistetty vuonna 2019 tehtyyn laserkeilaukseen. Kuvasta 21 huomataan, että poikkileikkauksen kohdalla olisi tapahtunut sekä eroosiota, että sedimentaatiota. Tämän selittää poikkileikkauksessa tapahtunut liukupintasortuma. Eroosioalue on siis uoman luiskan yläreunan osuus, joka on sortuman jälkeen siirtynyt uoman pohjalle. Uoman pohjalle sortunut maa näyttäytyy poikkileikkauksessa sedimentaationa.

Harmaalinna-alueella eroosio on voimakkainta uoman syvimällä alueella. Uoman syvänneura on Harmaalinna-alueen eteläisessä osassa joen kaarteessa oikeassa reunassa, mutta

joen suoralla osuudella se on likimäärin keskellä uomaa. Syväneura muistuttaa poikkileikkaukseltaan U-kirjainta. Tämä käy ilmi liitteessä 1 esitetyistä poikkileikkauksista. Syväneurasta eroosio näyttää laajenevan keskeltä sivuille, jolloin uoma jyrkkenee, kunnes se lopulta sortuu. Sortuman jälkeen sama prosessi alkaa alusta. Näin uoman syväne laajenee ja sen poikkileikkauksen pinta-ala kasvaa koko ajan.

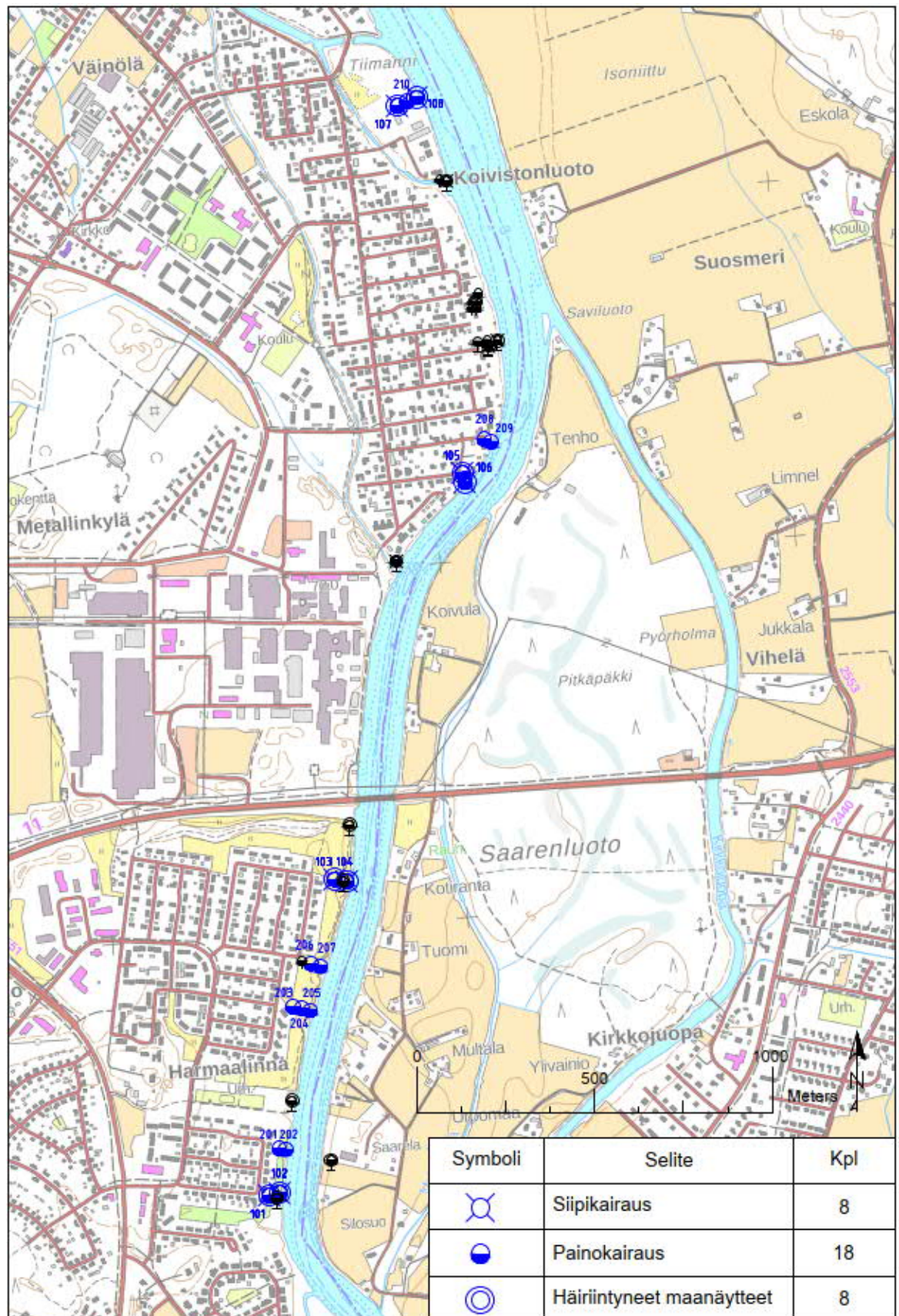
5.2 Pohjatutkimukset

Työtä varten tehtyjen pohjatutkimusten lisäksi alueelta löytyi aiemmin tehtyjä pohjatutkimuksia. Työssä hyödynnetyt aiemmin tehdyt pohjatutkimukset ovat vuosilta 2009 ja 2010, ne on merkitty kuvaan 22. Hyödynnettävissä oli painokairauksia 19 kpl, siipikairauksia neljästä eri pohjatutkimuspisteestä ja häiriintyneitä näytteitä yhdeksästä eri pohjatutkimuspisteestä. Häiriintyneistä näytteistä oli määritetty rakeisuus, vesipitoisuus, hienousluku ja häiritty leikkauslujuus. Painokairaukset ja häiriintyneiden näytteiden ottopaikat sijoituivat koko tutkimusalueen laajuudelle. Kaikki neljä siipikairausta sijoituivat Koivistonluodon alueelle.

Lisäksi käytettävissä on ollut laboratoriokokeita häiriintyneistä ja häiriintymättömistä näytteistä vuosilta 2007 ja 2009. Näytteitä on tutkittu Tampereen yliopiston laboratoriossa, sekä Porin kaupungin laboratoriossa. Ketosen (2010) mukaan tehtyjen ödometrikokeiden perusteella alueella ei ole havaittavissa ylikonsolidaatiota. Samoista pisteistä tehtiin myös kolmiaksaalikokeet tehokkaiden lujuusparametrien määrittämistä varten. Edellä mainitut ödometri- ja kolmiaksaalikokeet tehtiin kolmesta eri pohjatutkimuspisteestä, jotka eivät sijaitse nykyisillä tutkimisalueilla. Läheisimmältä tutkimuspisteeltä on tässä työssä tutkittavalla alueella matkaa noin kilometri.

Työtä varten tehtiin uusia maaperätutkimuksia alkuvuodesta 2021. Uudet tutkimukset on merkitty kuvaan 22 sinisellä värillä. Tutkimusten sijainti ja laatu määriteltiin jo tehtyjen pohjatutkimusten ja stabiliteetin kannalta alustavasti määriteltyjen kriittisimpien alueiden perusteella. Tutkimusalueella tehtiin uusia painokairauksia 18 kpl, siipikairauksia tehtiin kahdeksasta eri pohjatutkimuspisteestä ja häiriintyneitä näytteitä otettiin kahdeksasta eri pohjatutkimuspisteestä. Häiriintyneistä näytteistä määritettiin vesipitoisuus, rakeisuus, hienousluku ja häiritty leikkauslujuus.

Ensin tehtiin painokairaukset, joiden perusteella arvioitiin näytteenoton ja siipikairauksien syvyydet. Häiriintyneistä näytteistä määritettyjen rakeisuuksien perusteella optimoitiin vielä siipikairauksia. Siipikairaukset tehtiin syvyyksiltä, joissa painokairausvastus on pienimmillään ja maalaji on rakeisuuden perusteella savista silttiä tai savea. Häiriintyneet näytteet ja siipikairaukset on tehty samoilta syvyyksiltä. Tutkimuksia tehtiin joko kahdesta tai kolmesta pisteestä, samasta joen poikkileikkauksesta, jotta nähdään, kehittykö maan leikkauslujuus joesta kauemmas mentäessä. Kaikki tehdyt tutkimukset suoritettiin Porin kaupungin omalla kalustolla ja häiriintyneet näytteet analysoitiin Porin kaupungin maalaboratoriossa.



Kuva 22. Tutkimusalueen pohjatutkimukset. Työtä varten tehdyt uudet pohjatutkimukset sinisellä värillä ja aiemmin tehdyt mustalla. (sisältää Maanmittauslaitoksen Peruskarttarasteri 01/2021 aineistoa)

5.3 Laskentapoikkileikkausten valinta

Eroosion lisäksi laskentapoikkileikkausten valintaan vaikuttavat uoman ja maanpinnan geometria, rakennusten sijainti ja niiden perustamistavat, sekä maaperäolosuhteet. Voimakkaan eroosion alueilla stabiliteetti voi ajan kuluessa muuttua merkittävästi. Mitä jyrkempiä joen törmä ja uoma ovat, sitä alttiimpia ne ovat sortumille. Rakennusten sijainti lähellä joen törmää aiheuttaa perustamistavasta riippuen kuormitusta. Lisäksi rakennuksista lähteville liukupinnoille vaaditaan suurempaa varmuuskerrointa stabiliteetin osalta, koska jos rakennus sortuu liukupintasortuman mukana, niin vaara ihmishengelle on hyvin suuri. Lähtökohtana on valita laskentaleikkauksiksi kohdat, joissa stabiliteetti on pienimmillään ja mahdollinen sortuma aiheuttaisi vakavimmat vahingot ihmishengelle ja omaisuudelle. Tarkasteltavaksi valittiin yhteensä 20 2D-laskentapoikkileikkausta.

3D-laskentakohteiden valinnassa käytettiin hyödyksi 2D-laskennan tuloksia. 3D-laskentakohteiksi valittiin alueet, joissa 2D-laskennan kokonaisvarmuudet olivat alhaisimpia. Lisäksi valintaan vaikutti joen uoman geometria. Kuten luvussa 2 kerrottiin, niin 3D-tarkastelu on tärkeää erityisesti tilanteissa, joissa geometria on muuttuva. Tällaisia kohteessa ovat esimerkiksi eroosion aiheuttamat paikalliset syvänteet, jotka eivät ole pituussuuntaisesti jatkuvia, sekä joen kaarteet. Tarkasteltavaksi valittiin yhteensä 7 3D-laskentakohdetta.

Koivistonluodosta valittiin tarkasteltavaksi yhteensä 12 2D-laskentaleikkausta ja 4 3D-laskentakohdetta. Suurin osa laskennoista sijoittuu joen kapeimmalle kohdalle paaluvälille 29 100 - 29 800. Kyseiseltä paaluväliltä valittiin tarkasteltavaksi 6 2D-laskentaleikkausta ja 3 3D-laskentakohdetta. Tällä alueet rakennukset ovat hyvin lähellä jokea, eroosio on voimakasta, joen törmä on jyrkkä, sekä uoma on syvä. 3 laskentaleikkausta sijaitsee uoman leveämmällä ja matalammalla osuudella, jossa myös joen törmä on loivempi. Lisäksi 3 laskentaleikkausta valittiin Tiimanninluodosta, minne uusi asuinalue on suunnitteilla. Kaikki 2D-laskentaleikkaukset ja 3D-laskentakohteet on esitetty kuvassa 23.

Harmaalinnasta valittiin tarkasteltavaksi 7 2D-laskentaleikkausta, sekä 2 3D-laskentakohdetta. Lisäksi valittiin tarkasteltavaksi yksi laskentaleikkaus tutkimusalueen ulkopuolelta. Kyseinen laskentaleikkaus (31 550) on Ulvilan puolella, Kokemäenjoen

vastakkaisella rannalla Harmaalinnasta katsottuna (kuva 23). Ulvilan puoleisen laskentaleikkauksen kohdalla on tapahtunut vuonna 2013 joen törmän sortuma, jonka kohdalta suoritetaan takaisinlaskenta, eli lasketaan olemassa olevalla tiedolla alueen vakavuus ennen sortumaa. Takaisinlaskennan tuloksia voidaan verrata tutkittavilta alueilta saatuihin laskennan tuloksiin ja arvioida milloin ja miten sortumia voi tapahtua. Sortumaa tarkastellaan myös 3D-menetelmällä.

5.4 Laskentaparametrit

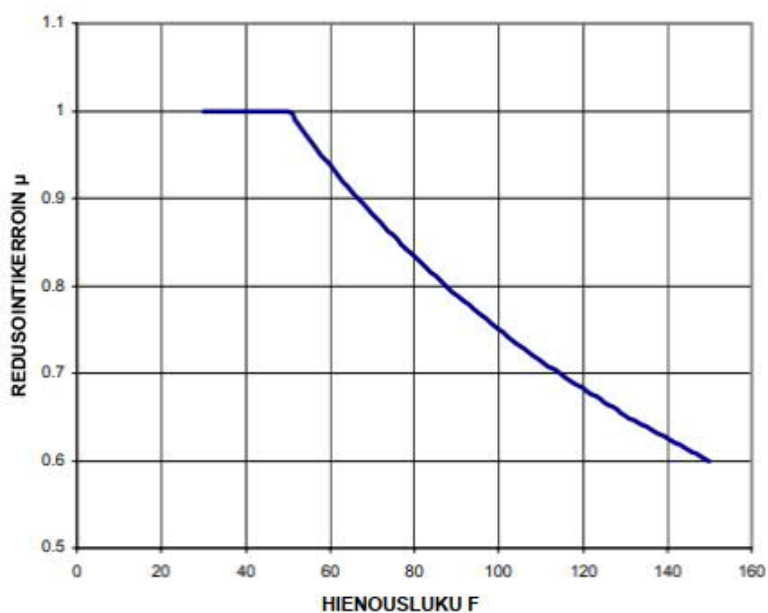
Laskentaparametrit määritettiin hyödyntämällä uusia ja vanhoja pohjatutkimuksia. Laskennassa tarvittavia parametreja ovat:

- γ tilavuuspaino (kN/m^3),
- φ kitkakulma ($^\circ$) ja
- c koheesio (kN/m^2).

Kitkakulma ja tilavuuspaino määritetään jokaiselle laskennoissa käytettävälle maalajikerrokselle ja koheesio ainoastaan suljetun tilan laskentaa varten koheesiomaalajikerroksille. Koheesion arvona suljetun tilan laskennassa käytetään siipikairauksella mitattu leikkauslujuutta, joka on redusoitu häiriintyneistä näytteistä määritetyn hienousluvun F avulla. Siipikairalla mitattu leikkauslujuus redusoidaan suunnitteluarvoksi kertomalla mitattu leikkauslujuus redusointikertoimella. Näin saadaan laskennassa koheesiota vastaava suljetun leikkauslujuuden s_u arvo. Redusointikerroin μ saadaan kaavan 5 avulla:

$$\mu = \frac{1,5}{1+F/100}, \quad (5)$$

missä F on hienousluku (Lehtonen & Mansikkamäki 2018). Yhtälöstä huomataan, että kertoimeksi μ tulee 1, kun hienousluku F on 50. Mikäli F on pienempi kuin 50, niin käytetään μ :n arvona 1. Kaavassa 5 esitettyä yhteyttä kuvastaa myös kuva 24.

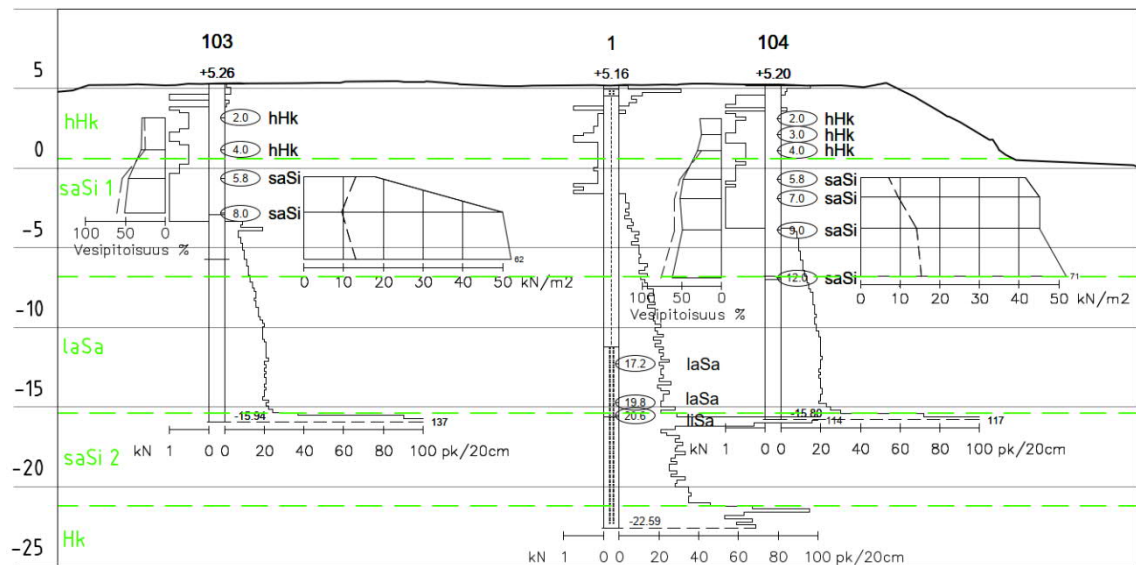


Kuva 24. Redusointikerroin hienousluvun mukaan (mukaillen Ratahallintokeskus 2005).

Kitkamaalajeilla kitkakulman arvoina käytetään painokairausten kairausvastusten ja maalajien mukaan arvioituja arvoja. Maalajit on määritetty häiriintyneistä näytteistä saatujen rakeisuuskäyrien mukaan. Rakeisuuskäyrät on määritetty pesuseulonnan ja hydrometrikokeiden perusteella. Hydrometrikokeen avulla saadaan määritettyä saven ja siltin rakeisuus, mikä ei pelkällä pesuseulonnalla onnistu. Koheesiomaalajeille kitkakulman arvot avoimen tilan laskentaa varten on määritetty myös kairausvastusten ja rakeisuuksien perusteella. Lisäksi arvioinnissa on käytetty apuna Ketosen (2010) tekemien kolmiaksaalikokeiden tuloksia. Tilavuuspainon arvioinnissa on myös hyödynnetty kairausvastuksia, rakeisuuksia, sekä vesipitoisuuksia.

Kuvassa 25 on esitetty jokipaalun 30 600 kohdalta suoritettujen pohjatutkimusten tulokset kairausdiagrammien muodossa. Pohjatutkimusten perusteella kuvaan on piirretty laskennassa käytettävät maalajirajat. Pohjatutkimuspisteiden 103 ja 104 tutkimukset on tehty vuonna 2021 ja pisteen 1 tutkimukset vuonna 2010. Taulukossa 6 on esitetty kyseisten pohjatutkimusten perusteella määritetyt maalajikerrosten parametrit. Taulukossa kerrokset on lueteltu maanpinnasta alkaen. Taulukossa koheesion nolosta poikkeavat arvot kuvaavat suljetun tilan laskennassa käytettäviä arvoja. Kun suljetun tilan laskennassa annetaan koheesiolle muu arvo kuin 0, niin silloin kitkakulman arvo

kyseisellä kerroksella on 0. Liitteissä esitetyissä laskentatuloksissa on esitetty laskennassa käytetyt maaparametrit, sekä maalajirajat.



Kuva 25. Pohjatutkimusleikkaus jokipaalun 30 600 kohdalta. Tutkimusten perusteella määritetyt maalajikerrokset vihreällä.

Taulukko 6. Jokipaalun 30 600 laskentaleikkauksessa käytetyt maaparametrit.

Kerros	Tilavuuspaino (kN/m ³)	Kitkakulma (°)	Koheesio (kN/m ²)
hHk	18	30	0
saSi 1	17	26	28
laSa	16	22	34
saSi 2	18	28	0
Hk	19	32	0

Joen törmän läheisyydessä sijaitsevien rakennusten oletettiin olevan perustettu paalujen varaan. Paaluperustuksista ei saatu täyttä varmuutta, minkä vuoksi tarkasteltiin kahdessa laskentaleikkauksessa tilannetta siten, että rakennukset on perustettu maanvaraisesti. Tällöin laskennassa käytettiin rakennuksen kohdalla 10 metrin levyistä 15 kPa:n tasokuormaa.

5.5 Vaadittava varmuuskerroin

Suomen rakentamismääräyskokoelman mukaan vaadittava kokonaisvarmuus rakennuspohjan alueelliselle sortumalle on 1,8 ja rakennuspohjan alueelliselle sortumalle piha-, puisto- ja virkistysalueilla, joilla ei ole asumiseen tai työntekemiseen tarkoitettuja rakennuksia tai vaativia rakenteita on 1,5. Tämän perusteella työssä käytetään vaadittavana varmuuskertoimena 1,8 liukupinnoilta, jotka ulottuvat rakennuksille saakka ja varmuuskerrointa 1,5 muiden liukupintojen osalta.

5.6 Mitoittavat tilanteet

Kriittisimmäksi tilanteeksi on arvioitu nopean vedenlaskun jälkeinen tilanne. Tämä arviointi perustuu kirjallisuuteen, sekä alueella aiemmin tapahtuneen suuren sortuman analysointiin. Ulkoisen vedenpinnan nopea aleneminen kohottaa huonosti vettä läpäisevässä maassa liukupinnalla vallitsevaa huokosveden ylipainetta, jolloin maan leikkausvastus pienenee (Slunga 1990). Vedenpinnan laskiessa joessa nopeasti, joen hienorakeisessa törmässä maan huokosissa oleva vesi ei ehdi purkautua yhtä nopeasti kuin vedenpinta joessa laskee. Tässä tapauksessa stabiliteettia heikentävät kohonnut huokosvedenpaine, sekä maan kasvanut tilavuuspaino joen törmässä. Tämän lisäksi luiskan passiivipuolella, eli joen puolella oleva stabiliteettia parantava vesimassa katoaa. Nopea vedenpinnan aleneminen joessa voi tapahtua, kun hyhyde- tai jääpato aiheuttaa ensin vedenpinnan nousun, minkä jälkeen padon purkautuessa vedenpinta joessa laskee nopeasti. Lisäksi nopeaa vedenpinnan vaihtelua aiheuttaa voimalaitosten harjoittama vuorokausi- ja viikkosäännöstely. Laskelmissa nopea vedenpinnan lasku oletetaan tapahtuvan keskivedenkorkeuden (MW) tasolta +0,5 alivedenkorkeuden (NW) tasolle -0,4, eli vedenpinta laskee 0,9 metriä.

Suurempikin vedenpinnan lasku on mahdollinen. Esimerkiksi hyhydetulvan tilanteessa on mahdollista, että vesi laskee nopeasti keskimääräisen ylivedenkorkeuden (MHW) tasolta +1,7 keskivedenkorkeuden (MW) tasolle +0,5. Tulvatilanteessa joen vedenpinta ei kuitenkaan ehdi olla korkeimmalla tasollaan riittävän pitkään, jotta se ehtisi vaikuttaa laajemmin huonosti vettä johtavassa koheesiomaassa sijaitsevaan pohjavedenpintaan. Lyhytaikainen tulvatilanteen korkein vedenpinnan taso ehtii vaikuttaa pohjavedenpintaan ainoastaan lyhyeltä matkaa. Kun pohjavedenpinta ei ehdi nousta tulvatilannetta vastaavalle vedenpinnan tasolle, niin ei törmän tilavuuspaino tai huokosvedenpaine

kohoa kuin luiskan läheisyydessä. Tällöin nopea vedenpinnan lasku MHW-tasolta MW-tasolle vaikuttaa vain lyhyiden liukupintojen stabiliteettiin. Vedenpinnan lasku MW-tasolta NW-tasolle vaikuttaa puolestaan stabiliteettiin laajemmin, koska pohjavedenpinnan taso mukailee keskivedenkorkeutta (MW).

Toinen tarkasteltava tilanne on pitkäaikainen alivesi. Pitkäaikaisen aliveden tilanne on vallitseva pitkinä kuivina kausina. Pitkäaikaisen aliveden tilanteessa stabiliteettia parantava veden vaikutus luiskan passiivipuolella on pienempi, mitä keskivedenkorkeuden tilanteessa. Eli samaan tapaan kuin nopean vedenpinnan laskun tapauksessa. Erona kuitenkin on se, että pitkäaikaisen aliveden tilanteessa huokosveden ylipaine on ehtinyt tasoittua. Huokosvedenpaine lasketaan pohjavedenpinnan mukaan. Pohjavedenpinnan oletetaan laskevan loivasti joessa vallitsevan aliveden tasolle. Pitkäaikaisen aliveden tasona käytetään alivedentasoa (NW), joka tutkimusalueella on -0,4.

Lisäksi laskenta suoritetaan keskivedenkorkeuden (MW) mukaisella vedenpinnan tasolla +0,5. Alueelta ei ole mitattua tietoja pohjavedenkorkeudesta, joten keskivedenkorkeuden tilanteessa pohjaveden oletetaan joen törmässä olevan samalla tasolla kuin joessa (+0,5). Pitkäaikaisen aliveden tilanteessa pohjavedenpinta ranta-alueella nousee loivasti alivedentasolta keskivedentasolle. Nopean vedenpinnan laskun tilanteessa pohjavedenpinnan oletetaan olevan törmässä tasolla +0,5.

Edellä mainittujen mitoittavien tilanteiden mukaiset tarkastelut suoritetaan 2D-laskentaohjelmistolla. 3D-laskentaohjelmistolla tarkastellaan ainoastaan keskivedenkorkeuden mukainen tilanne. Kaikkien mitoittavien tilanteiden mukaisia tulosteita ei ole esitetty työn liitteissä. Taulukossa 7 on esitetty, minkä mitoittavan tilanteen mukaiset laskennat miltäkin paalulukemalta on mukana työn liitteenä. Kaikki tulokset on esitetty taulukoissa luvuissa 6.1, 6.2 ja 6.3. Kaikista lukujen 6.1, 6.2 ja 6.3 taulukoissa mainittavista tuloksista on tehty tulosteet, jotka on toimitettu erikseen Porin kaupungille.

Taulukko 7. Työn liitteenä olevat laskentapoikkileikkaukset ja niissä tutkitut mitoittavat tilanteet. Poikkileikkauksen jäljessä olevat kirjaimet tarkoittavat aluetta missä kyseinen laskentaleikkaus sijaitsee (K=Koivistonluoto, H=Harmaalinna ja U=Ulvila)

Laskentaleikkaus (jokipaalu)	Keskivedentilanne (MW)		Aliveden tilanne (NW)	Nopea vedenpinnan lasku (MW→NW)
	2D	3D		
28 150 K				
28 250 K	x	x		x
28 450 K				
28 720 K				
28 960 K	x			x
29 080 K				
29 240 K	x			
29 280 K	x	x		x
29 380 K	x	x	x	x
29 450 K	x	x		
29 580 K	x			
29 700 K	x			
30 600 H	x	x		x
30 880 H				
31 000 H				
31 140 H				
31 450 H	x	x		x
31 500 H				
31 550 U	x	x		x
31 650 H	x			

5.7 Laskentaohjelmisto ja laskentamenetelmät

Stabiliteetin laskentaan on olemassa useita laskentaohjelmistoja. Tässä työssä laskennat on päätetty tehdä Rocsciencen Slide2- ja Slide3-laskentaohjelmistoilla. Slide2 on kaksiulotteinen rajatasapainomenetelmää käyttävä laskentaohjelmisto. Ohjelmisto laskee varmuuskertoimen F sortumaa vastaan oletetulle liukupinnalle käyttämällä valittua laskentamenetelmää (esim. Bishopin menetelmä). Valitusta laskentamenetelmästä riippuen liukupinta voi olla joko ympyränmuotoinen tai ympyrästä poikkeava. Laskennassa liukupinnan ja maanpinnan välinen osuus jakautuu lamelleihin, joiden tasapainoa tarkastelleen. Lähtötietoina ohjelmaan syötetään:

- luiskan geometria,

- pohjavedenpinnan taso,
- eri maakerroksien laskentaparametrit ja
- ulkoiset kuormat.

Annettujen lähtötietojen perusteella ohjelma laskee vaarallisimpien liukupintojen varmuuskertoimet.

Slide3 on kolmiulotteinen laskentaohjelmisto, joka pohjautuu Silde2-laskentaohjelmistoon. Slide3 tarkastelee liukupinnan ja maanpinnan välisten pylväiden tasapainoa. Kolmiulotteinen versio tarvitsee lähtötietoina samat asiat mitä kaksiulotteinen. Geometrian syöttäminen on monimutkaisempaa mitä kaksiulotteisessa versiossa. Geometrian voi luoda laskentaohjelmalla tai lukea sisään toisella ohjelmistolla tehdyn mallin. Tehdyissä tarkasteluissa geometria luotiin luotausten ja laserkeilausten avulla. Yhden laskentakohteen koko oli keskimäärin 100x100 metriä. Vertailun vuoksi laskenta suoritetaan myös sisään lukemalla geometria kaksiulotteisesta laskennasta. Slide3 luo kolmiulotteisuuden lisäämällä kaksiulotteisen laskennan koordinaatiston kolmannen akselin. Slide3:ssa etuna on, että liukupinnan suuntaa ei tarvitse ennalta määrätä. Liukumasuunta määräytyy laskennan tuloksena jokaiselle liukupinnalle.

5.8 Käytettävät laskentamenetelmät

2D-menetelminä työssä käytettiin Bishopin yksinkertaistettua menetelmää, sekä Morgenstern-Pricen menetelmää. Näistä Bishopin menetelmä on yksinkertaisempi, se ei täytä vaakasuuntaista voimatasapainoehtoa, eikä huomio lamellien välisiä leikkausvoimia, kuten Morgenstern-Pricen menetelmä puolestaan tekee. Toinen suuri ero näiden menetelmien välillä on liukupinnan muoto. Bishopin yksinkertaistetussa menetelmässä liukupinnan oletetaan olevan ympyränmuotoinen, kun taas Morgenstern-Pricen menetelmällä laskettaessa liukupinta voi olla ympyränmuotoinen, tai siitä poikkeava.

Bishopin yksinkertaistettu menetelmä valittiin, koska se on yleisesti paljon käytetty, yksinkertainen ja nopea menetelmä. Lisäksi Bishopin menetelmän ympyränmuotoinen liukupinta soveltuu parhaiten käytettäväksi koheesiomailla, mikä on todettu tutkimusalueella vallitsevaksi maalajiksi. Morgenstern-Pricen menetelmä valittiin, koska se täyttää kaikki voimatasapainoehdot ja huomioi lamellien väliset voimat (taulukko 1).

Tämän takia kyseisen menetelmän katsotaan olevan tarkempi verrattuna esimerkiksi Bishopin yksinkertaistettuun menetelmään.

3D-laskenta suoritettiin käyttäen Bishopin yksinkertaistettua menetelmää. Liukupintojen muotoina käytettiin palloa ja ellipsoidia. Pallon muotoiset liukupinnat vastasivat kaksiulotteisen laskennan ympyrän muotoisia liukupintoja ja ellipsoidin muotoiset puolestaan ympyrästä poikkeavia.

6 TULOKSET

6.1 Koivistonluoto

Koivistonluodon tulokset on jaettu kolmeen osaan. Ensimmäisessä osassa on esitetty tulokset paaluväliltä 28 000-28 500, toisessa osassa on esitetty tulokset paaluväliltä 28 500-29 100 ja kolmannessa osassa on esitetty tulokset paaluväliltä 29 100-29 800. 2D-laskennan tuloksina on esitetty mitoittavien tilanteiden mukaiset kokonaisvarmuudet, sekä turvallinen rakentamisetäisyys ($F \geq 1,8$). Turvallinen rakentamisetäisyys on mitattu joen törmän harjasta (kuva 26). Turvallinen rakentamisetäisyys ja varmuuskerroin asuinrakennukselta on laskettu keskivedentilanteessa. Taulukoissa on kerrottu mitoitustilanne, menetelmä (avoin tila/suljettu tila), sekä liukupinnan muoto. Ympyrän muotoisia liukupintoja on tarkasteltu Bishopin laskentamenetelmällä ja vapaan muotoisia liukupintoja on tarkasteltu Morgenstern-Pricen menetelmällä.

3D-laskennan tulokset on eritelty omiin taulukoihin. Taulukoissa on esitetty keskivedentilanteen mukaiset kokonaisvarmuudet ellipsoidin ja ympyrän muotoisille liukupinnoille. Jokaisesta laskentakohteesta laskenta on suoritettu mittausaineistojen mukaisilla pinnoilla, sekä 2D-laskennan mukaisella geometrialla. Taulukoissa on kokonaisvarmuuden lisäksi kerrottu liukuvan maa-aineksen tilavuus ja leveys.

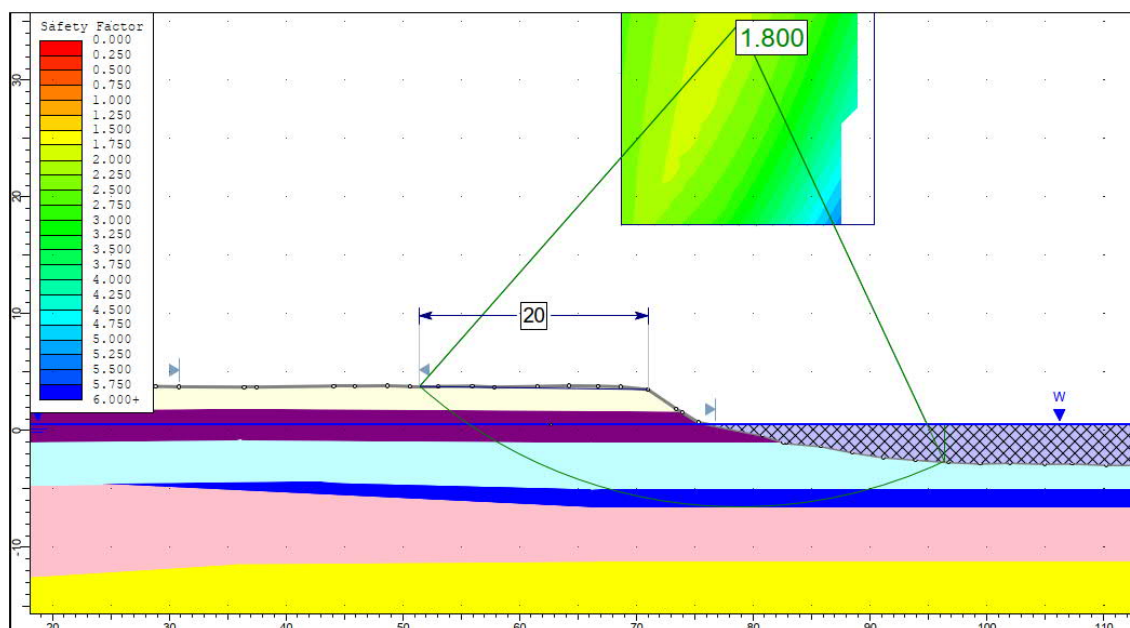
6.1.1 Paaluväli 28 000-28 500

Koivistonluodon 2D-laskennan tulokset paaluväliltä 28 000-28 500 on esitetty taulukossa 8. Paaluväli edustaa Koivistonluodon pohjoisinta osaa Tiimanninluotoa. Paaluväliltä tarkasteltiin 3 laskentaleikkausta, jokipaalun 28 250 leikkauksesta tarkasteltiin kaikkien mitoittavien tilanteiden ja menetelmien yhdistelmät. Avoimen tilan tarkasteluissa paalun 28 250 kohdalta määritettiin alle yhden kokonaisvarmuudet nopean vedenpinnan laskun jälkeen. Kyseisen poikkileikkauksen kohdalla joen törmä on jyrkin. Kahdesta muusta leikkauksesta ei tarkasteltu kaikkia mitoittavia tilanteita, koska niissä jo keskivedentilanteessa kokonaisvarmuus oli merkittävästi parempi. Paaluvälin avoimen tilan tarkasteluiden kokonaisvarmuudet vaihtelivat keskivedentilanteessa välillä 1,04-1,66. 3D-laskenta suoritettiin laskentaleikkauksen 28 250 kohdalta.

Taulukko 8. Kokonaisvarmuuskertoimet ja turvalliset rakentamisetäisyydet ($F \geq 1,8$) paaluvälin 28 000-28 500 2D-laskentaleikkauksilta. Tähdellä (*) merkityt laskentatulokset ovat mukana liitteenä olevissa tulosteissa.

Mitoitustilanne, menetelmä ja liukupinnan muoto	Paalulukema		
	28 150	28 250	28 450
Keskivesi, avoin, ympyrä	1,35	1,12*	1,66
Alivesi, avoin, ympyrä		1,10	
Nopea vedenpinnan lasku, avoin, ympyrä		0,96*	
$F \geq 1,8$, keskivesi, avoin, ympyrä	15 m	20 m*	9 m
F nykyiseltä rakennukselta, keskivesi, avoin, ympyrä	1,52		1,75
Keskivesi, suljettu, ympyrä		1,68*	
Alivesi, suljettu, ympyrä		1,52	
Nopea vedenpinnan lasku, suljettu, ympyrä		1,52	
Keskivesi, avoin, vapaa		1,04	
Alivesi, avoin, vapaa		1,06	
Nopea vedenpinnan lasku, avoin, vapaa		0,92	
$F \geq 1,8$, keskivesi, avoin, vapaa		24 m	
Keskivesi, suljettu, vapaa		1,55	
Alivesi, suljettu, vapaa		1,41	
Nopea vedenpinnan lasku, suljettu, vapaa		1,41	

Paaluvälillä 28 000-28 500 ei ole luotausten perusteella tapahtunut merkittävää eroosiota, sekä uoma on matala, syvin kohta tasolla -4, kun maanpinta on korkeimmillaan tasolla +4,5. Kokonaisvarmuuksiltaan pienimmät liukupinnat ovat lyhyitä (liite 2). Joen törmästä kauemmas mentäessä kokonaisvarmuus kasvaa nopeasti, koska uomassa ei ole syvännettä mistä pidemmät liukupinnat leikkautuisivat ulos. Paaluvälin 28 000-28 500 kriittisimmällä alueella ei vielä ole asuinrakennuksia, mutta alueelle suunnitellaan rivitaloyhtiötä. Tästä johtuen merkittävimpinä tuloksina voidaan pitää vaadittavaa etäisyyttä, jotta $F \geq 1,8$ (taulukko 8). Jokipaalun 28 250 turvallisen rakentamisetäisyyden määrittäminen on esitetty kuvassa 26. Kokonaisvarmuus 1,8 saavutetaan 20 metrin etäisyydellä joen törmän harjasta. Seuraavissa kappaleissa esitetyt turvalliset rakentamisetäisyydet on mitattu samasta kohtaa joen törmää kuin leikkauksen 28 250 tilanteessa.



Kuva 26. Turvallinen rakentamisetäisyys (20 m) jokipaalun 28 250 kohdalla. Keskivedentilanne, avoin tila ja ympyränmuotoinen liukupinta.

3D-laskenta suoritettiin paalun 28 250 kohdalta, tulokset on esitetty taulukossa 9. Taulukon lopussa on vastaavat 2D-laskennan avoimen tilan keskivedentilanteen mukaiset kokonaisvarmuudet. 3D-laskennan kokonaisvarmuudet ovat suurempia mitä 2D-laskennan. 3D-laskennassa määritetyt liukupinnat vastasivat pituudeltaan 2D-laskennassa määritettyjä. Liukuvat maamassat ovat myös pieniä. 2D-laskennan mukaisella geometrialla rakennettujen 3D-laskentojen tulokset ovat hyvin lähellä mittausaineistoon perustuvia laskentoja. Tämä johtuu siitä, että laskentakohteessa geometria ei muutu pituussuunnassa merkittävästi.

Taulukko 9. 3D-laskennan kokonaisvarmuudet (F), liukuvan maa-aineksen tilavuudet (m^3) ja liukupintojen leveydet (m) jokipaalun 28 250 kohdalta. Tähdellä (*) merkityt laskentatulokset ovat mukana liitteenä olevissa tulosteissa.

Laskentamenetelmä	Paalu 28 250		
	F	m^3	m
3D Ellipsoidi-liukupinta*	1,12	250	20
3D Pallo-liukupinta	1,23	260	15
3D Ellipsoidi (2D geometria)	1,03	350	25
3D Pallo (2D geometria)	1,18	340	15
2D Ympyrä-liukupinta	1,12		
2D Vapaa liukupinta	1,04		

6.1.2 Paaluväli 28 500-29 100

Koivistonluodon 2D-laskennan tulokset paaluväliltä 28 500-29 100 on esitetty taulukossa 10. Kyseinen paaluväli edustaa Koivistonluodon keskiosaa. Paaluväliltä tarkasteltiin 3 laskentaleikkausta, jokipaalun 28 720 leikkauksesta ei tarkasteltu kaikkia tilanteita, koska lyhyimpien liukupintojen kokonaisvarmuudet olivat kyseisessä kohtaa suuria, eikä tarvetta tarkemmalle tarkastelulle näin ollen ole. Paaluvälin avoimen tilan tarkasteluiden kokonaisvarmuudet vaihtelivat keskivedentilanteessa välillä 1,21-1,84. Paaluväliltä ei tehty 3D-laskentaa.

Taulukko 10. Kokonaisvarmuuskertoimet ja turvalliset rakentamisetäisyydet ($F \geq 1,8$) paaluvälin 28 500-29 100 2D-laskentaleikkauksilta. Tähdellä (*) merkityt laskentatulokset ovat mukana liitteenä olevissa tulosteissa.

Mitoitustilanne, menetelmä ja liukupinnan muoto	Paalulukema		
	28 720	28 960	29 080
Keskivesi, avoin, ympyrä	1,84	1,48*	1,21
Alivesi, avoin, ympyrä		1,43	1,14
Nopea vedenpinnan lasku, avoin, ympyrä		1,19*	1,02
$F \geq 1,8$, keskivesi, avoin, ympyrä	2 m	16 m	28 m
F nykyiseltä rakennukselta, keskivesi, avoin, ympyrä	3,50	2,17*	1,82
Keskivesi, suljettu, ympyrä		2,29	1,47
Alivesi, suljettu, ympyrä		2,04	
Nopea vedenpinnan lasku, suljettu, ympyrä		2,02	
Keskivesi, avoin, vapaa		1,45	
Alivesi, avoin, vapaa		1,42	
Nopea vedenpinnan lasku, avoin, vapaa		1,16	
$F \geq 1,8$, keskivesi, avoin, vapaa		20 m	
F nykyiseltä rakennukselta, keskivesi, avoin, vapaa		2,03	
Keskivesi, suljettu, vapaa		2,23	
Alivesi, suljettu, vapaa		1,97	
Nopea vedenpinnan lasku, suljettu, vapaa		1,96	

Paaluvälillä 28 500-29 100 ei ole luotausten perusteella tapahtunut merkittävää eroosiota, syvimmillään uoman pohja on tasolla -8. Paaluvälillä uoma syvenee ja kapenee yläjuoksulle mentäessä. Samalla joen törmä jyrkkenee. Tämä näkyy kokonaisvarmuuksien heikkenemisenä, kun siirrytään laskentaleikkaukselta seuraavalle (taulukko 10). Paaluvälin lopussa (laskentaleikkaus 29 080) nopean vedenlaskun tilanteessa saadaan kokonaisvarmuudeksi 1,02. Tarkasteltujen leikkausten perusteella paaluvälillä kokonaisuudessaan täyttyy rakennuksilta lähteville liukupinnoille oleva kokonaisvarmuuden vaatimus ($F \geq 1,8$).

6.1.3 Paaluväli 29 100-29 800

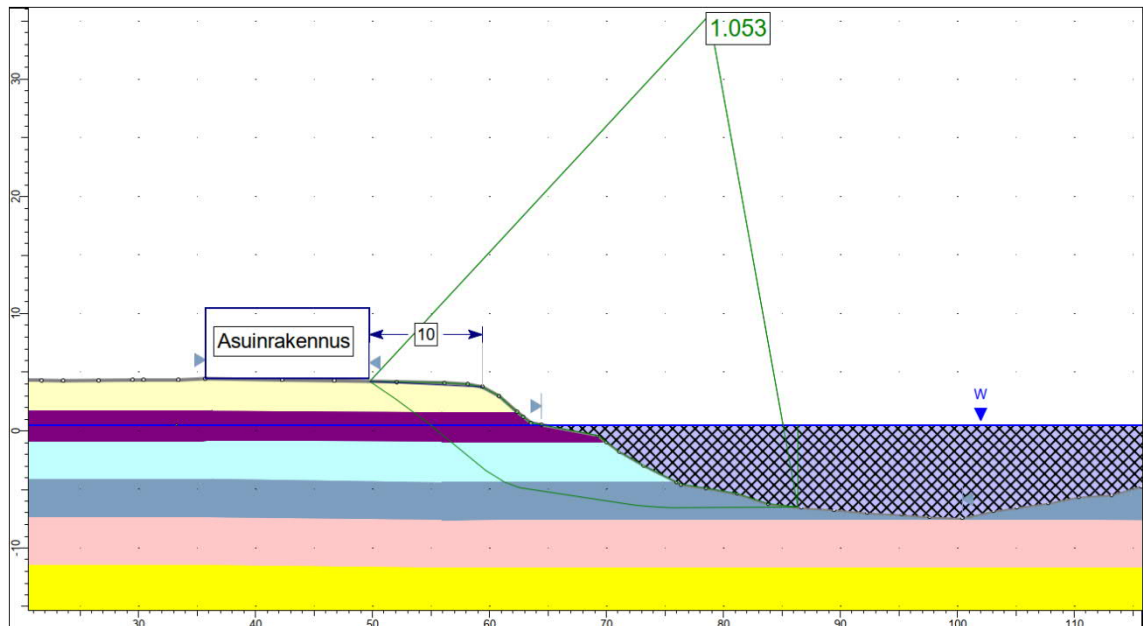
Koivistonluodon tulokset paaluväliltä 29 100-29 800 on esitetty taulukossa 11. Kyseinen paaluväli edustaa Koivistonluodon eteläisintä osaa. Paaluväliltä tarkasteltiin 6 laskentaleikkausta, joista kaikista tehtiin laaja-alainen tarkastelu, koska kokonaisvarmuudet alueella olivat alhaisia. Paaluvälin avoimen tilan tarkasteluiden kokonaisvarmuudet vaihtelivat keskivedentilanteessa välillä 0,87-1,38. 3D-laskenta suoritettiin laskentaleikkauksien 29 280, 29 450 ja 29 580 kohdilta.

Taulukko 11. Kokonaisvarmuuskertoimet ja turvalliset rakentamisetäisyydet ($F \geq 1.8$) paaluvälin 28 500-29 100 2D-laskentaleikkauksilta. Tähdellä (*) merkityt laskentatulokset ovat mukana liitteenä olevissa tulosteissa.

Mitoitustilanne, menetelmä ja liukupinnan muoto	Paalulukema					
	29 240	29 280	29 380	29 450	29 580	29 700
Keskivesi, avoin, ympyrä	0,98*	0,93*	1,02*	1,34*	1,30*	1,38*
Alivesi, avoin, ympyrä	0,94	0,90	0,97*	1,27	1,34	1,50
Nopea vedenpinnan lasku, avoin, ympyrä	0,82	0,81*	0,91*	1,21	1,19	1,31
$F \geq 1.8$, keskivesi, avoin, ympyrä	28 m	30 m	29 m*	25 m	15 m	18 m
F nykyiseltä rakennukselta, keskivesi, avoin, ympyrä	1,13*	1,10*	1,07*	1,35*	1,30*	1,58*
Keskivesi, suljettu, ympyrä	1,06	1,04	0,96	1,17	1,33	1,32
Alivesi, suljettu, ympyrä	0,99	0,96	0,89	1,08	1,22	1,29
Nopea vedenpinnan lasku, suljettu, ympyrä	0,98	0,95	0,88	1,07	1,22	1,29
Keskivesi, avoin, vapaa	0,95	0,87*	0,93*	1,15*	1,21	1,35
Alivesi, avoin, vapaa	0,93	0,87	0,90	1,12	1,27	1,44
Nopea vedenpinnan lasku, avoin, vapaa	0,81	0,77	0,86	1,04	1,12	1,27
$F \geq 1.8$, keskivesi, avoin, vapaa	33 m	36 m	35 m	28 m	21 m	19 m
F nykyiseltä rakennukselta, keskivesi, avoin, vapaa	1,11	1,05	1,00*	1,23	1,21	1,55
Keskivesi, suljettu, vapaa	1,01	1,01	0,91	1,06	1,23	1,27

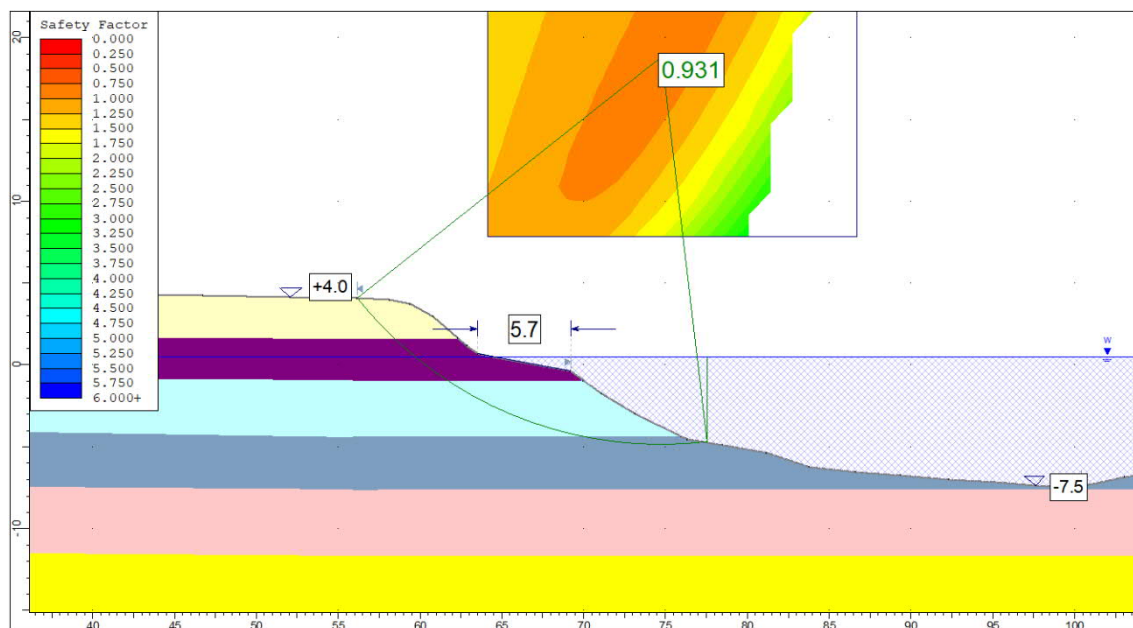
Tarkastelun perusteella Koivistonluodon alhaisimmat kokonaisvarmuudet ovat selvästi paaluvälillä 28 500-29 100. Tämän selittää uoman ja törmän geometrian muutokset siirryttäessä alajuoksulta mittalinjaa pitkin yläjuoksulle, sillä maaparametrit eivät muutu merkittävästi alueella, eikä muita muuttujia ole edellisiin paaluväleihin verrattuna. Uoma on syvimmillään tasolla -12.2 leikkauksen 29 580 kohdalla. Kokonaisvarmuudet eivät kuitenkaan ole alhaisimmillaan kyseisessä leikkauksessa. Tarkastelun alhaisimmat kokonaisvarmuudet määritettiin leikkauksen 29 280 kohdalta. Pienin varmuuskerroin saatiin nopean vedenpinnan laskun tilanteessa vapaalla liukupinnalla ($F=0,77$). Samasta leikkauksesta rakennukselta lähtevälle liukupinnalle määritettiin varmuuskertoimeksi

1,05 (kuva 27). Huomioitavaa on, että kyseinen kokonaisvarmuus on saatu keskivedentilanteessa, mikä ei tarkastelun perusteella ole mitoittavin tilanne. Paaluvälin missään leikkauksessa ei täyttynyt rakennuksilta vaadittava kokonaisvarmuus ($F \geq 1,8$).



Kuva 27. Kokonaisvarmuus rakennukselta lähtevälle liukupinnalle (1,05) jokipaalun 29 280 kohdalla. Keskivedentilanne, avoin tila ja vapaa liukupinta.

Kuvassa 28 on esitetty leikkauksen 29 280 avoimen tilan keskiveden tilanne. Ympyrän muotoisella liukupinnalla saatiin kokonaisvarmuudeksi 0,93. Leikkauksessa huomioitavaa on vesirajassa sijaitseva pengertasanne, jonka pituus on 5,7 m. Pengertasanteen jälkeen uoma laskee jyrkästi. Paaluvälillä alhaisimman kokonaisvarmuuden omaavat liukupinnat ovat pitkiä ja leikkautuvat ulos uomassa vasta pengertasanteen jälkeisestä luiskasta. Paalun 29 280 kohdalla pengertasanne on hyvin kapea, minkä vuoksi kyseisessä kohdassa kokonaisvarmuudet on alhaisimpia. Samankaltainen pengertasanne on koko paaluvälillä 28 500-29 100, tasanteen leveys ainoastaan kasvaa mentäessä kohti paaluvälin loppua.



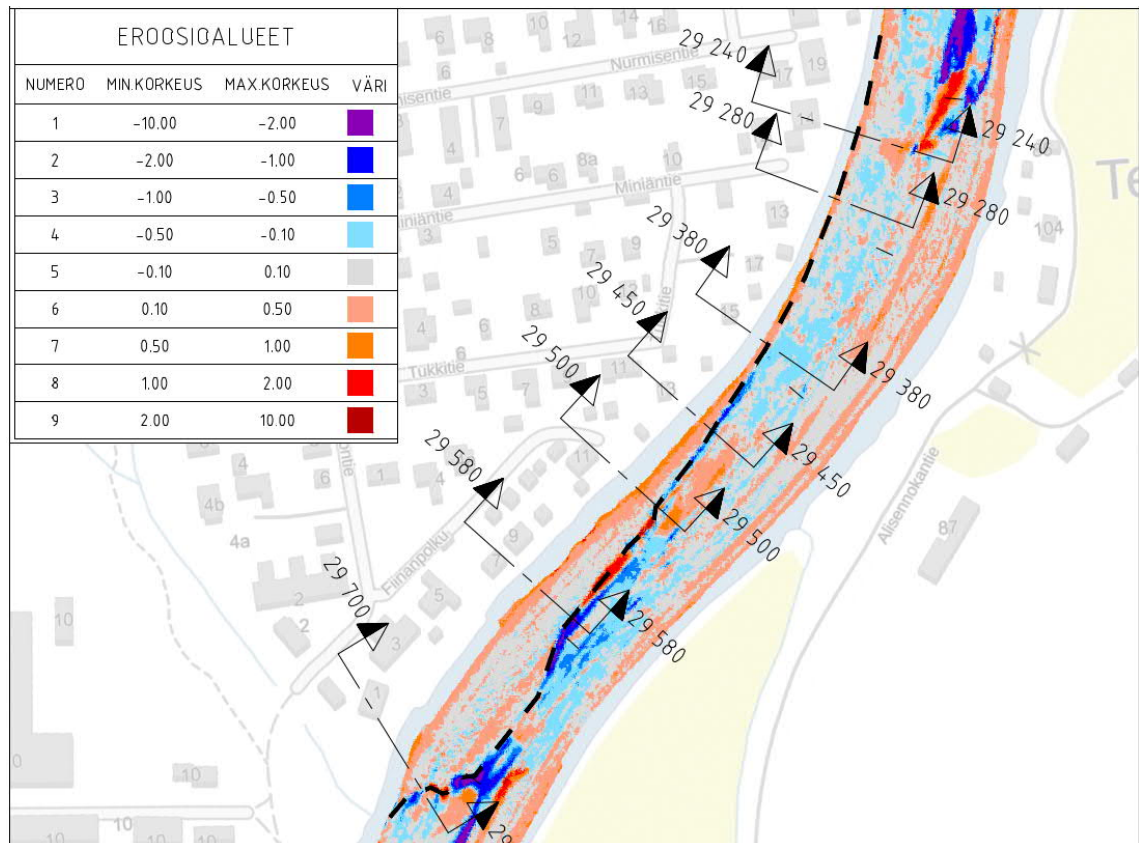
Kuva 28. Laskenta jokipaalun 29 280 kohdalta. Keskivedentilanne, avoin tila ja ympyränmuotoinen liukupinta. Pengertasanteen leveys 5,7 m ja kokonaisvarmuus 0,93.

Taulukossa 12 on paaluvälin 29 100-29 800 laskentaleikkauksien kokonaisvarmuudet, pengertasanteiden leveydet, sekä leveyksien muutokset vuosien 2010-2014 välisellä ajalla. Pengertasanteen leveyden muutos on mitattu vuosien 2010 ja 2014 suoritettujen luotausten perusteella. Kokonaisvarmuudet on laskettu käyttäen keskiveden korkeutta, avointa tilaa ja ympyrän muotoista liukupintaa. Paalun 29 700 laskentaleikkauksessa joen törmä on loivempi, mitä muualla, joten kyseisen leikkauksen tilanne ei ole täysin vertailukelpoinen muihin taulukossa esitettyihin arvoihin. Taulukosta huomataan, että pengertasanne on kapeimmillaan leikkauksen 29 240 kohdalla, mutta kokonaisvarmuus ei kuitenkaan ole alhaisin. Paaluvälillä 29 150-29 250 on kunnostettu rantaa louheverhouksella, mikä vaikuttaa leikkauksen 29 240 kokonaisvarmuuteen. Louheverhouksen rakentamisen yhteydessä on luultavasti myös joen törmän geometria muokattu loivemmaksi. Leikkauksien 29 280-29 580 tulokset ovat vertailukelpoisia pengertasanteen leveyden suhteen. Suurin muuttuja edellä mainittujen leikkausten välillä on pengertasanteen leveys. Laskennoissa käytetyt maaparametrit, sekä uoman ja törmän geometria pengertasannetta lukuun ottamatta ovat hyvin samankaltaisia. Paalulta 29 500 tarkasteltiin vain taulukon mukainen tilanne.

Taulukko 12. Paaluvälin 29 100-29 800 laskentaleikkauksien kokonaisvarmuus, pengertasanteen leveys ja pengertasanteen leveyden muutos vuosina 2010-2014.

Laskentaleikkaus	Kokonaisvarmuus F	Pengertasanteen leveys (m)	Pengertasanteen muutos 2010-2014 (m)
29 240	0,98	4,3	Ei muutosta
29 280	0,93	5,7	Ei muutosta
29 380	1,02	10,6	Ei muutosta
29 450	1,34	16,8	-1,5
29 500	1,68	27	-1,0
29 580	>1,8	40	-1,5
29 700	>1,8	27	-1,5

Kuvassa 29 on katkoviivalla kuvattu pengertasanteen ulkoreunaa. Kuvassa eroosio tarkoittaa pystysuuntaista korkeuden muutosta, kun taas taulukossa 12 muutos tarkoittaa vaakasuuntaisen mitan muutosta. Kuvasta 29 ja taulukosta 12 huomataan, että missä eroosio on voimakasta, niin siellä myös pengertasanne kapenee. Taulukon perusteella voidaan ajatella esimerkiksi leikkauksen 29 450 kokonaisvarmuuden lähenevän leikkauksen 29 380 tilannetta seuraavasti; jos neljässä vuodessa pengertasanne on vetäytynyt 1,5 metriä, niin 6 metrin vetäytyminen kestäisi tällöin 16 vuotta. 16 vuoden jälkeen paalun 29 450 kokonaisvarmuus vastaisi siis nyt määritettyä paalun 29 380 kokonaisvarmuutta.



Kuva 29. Pengertasanteen reuna katkoviivalla. Taustalla kappaleessa 5.1 esitetty eroosiokartta. (sisältää Maanmittauslaitoksen Taustakarttasarjan 01/2021 aineistoa)

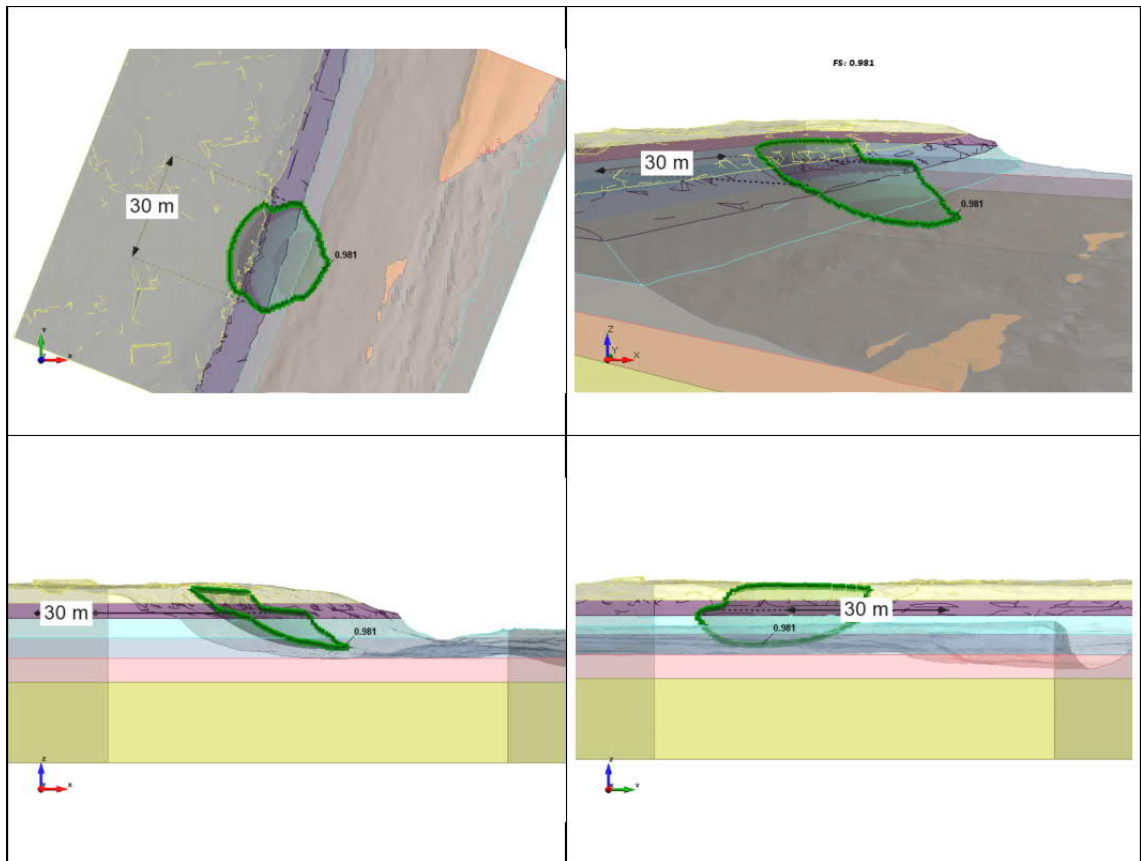
3D-laskennan tulokset paaluväliltä 29 100-29 800 on esitetty taulukossa 13. Paaluvälille sijoittui kolme laskentakohdetta. 2D-laskentaleikkauksista 29 240, 29 280, 29 380, 29 450 ja 29 580 sijoituivat laskentakohteiden sisälle. Taulukossa 13 ei ole esitetty erikseen 3D-laskennan tuloksia leikkauksen 29 240 kohdalta, koska kyseinen leikkaus oli hyvin lähellä leikkausta 29 280. Lisäksi uoman ja törmän geometria ei muutu merkittävästi leikkausten välillä. Taulukon lopussa on 3D-laskentaa vastaavalta kohdalta 2D-laskennan avoimen tilan keskivedentilanteen mukainen kokonaisvarmuus. Taulukossa saman paalulukeman sarakeessa esitettyjen 3D- ja 2D-laskentojen liukupinnat vastaavat pituudeltaan toisiaan. Mittausaineistoon perustuvien 3D-laskentojen kokonaisvarmuudet vaihtelivat välillä 0,98-1,40.

Taulukko 13. 3D-laskennan kokonaisvarmuudet (F), liukuvan maa-aineksen tilavuudet (m^3) ja liukupintojen leveydet (m) paaluväliltä 29 100-29 800. Tähdellä (*) merkityt laskentatulokset ovat mukana liitteenä olevissa tulosteissa.

Laskentamenetelmä	Paalulukema											
	29 280			29 380			29 450			29 580		
	F	m^3	m	F	m^3	m	F	m^3	m	F	m^3	m
3D Ellipsoidi	0,98 *	1050	30	1,03 *	2930	55	1,36 *	4700	50	1,31 *	600	20
3D Pallo	0,98	1100	30	1,05 *	1800	40	1,40	3650	45	1,40	510	20
3D Ellipsoidi (2D geometria)	0,91	3050	75	1,04	3500	65	1,41	6660	55	1,22	767	25
3D Pallo (2D geometria)	0,97	820	30	1,10	1700	40	1,45	4300	50	1,33	480	20
2D Ympyrä	0,93			1,02			1,34			1,30		
2D Vapaa	0,87			0,93			1,13			1,21		

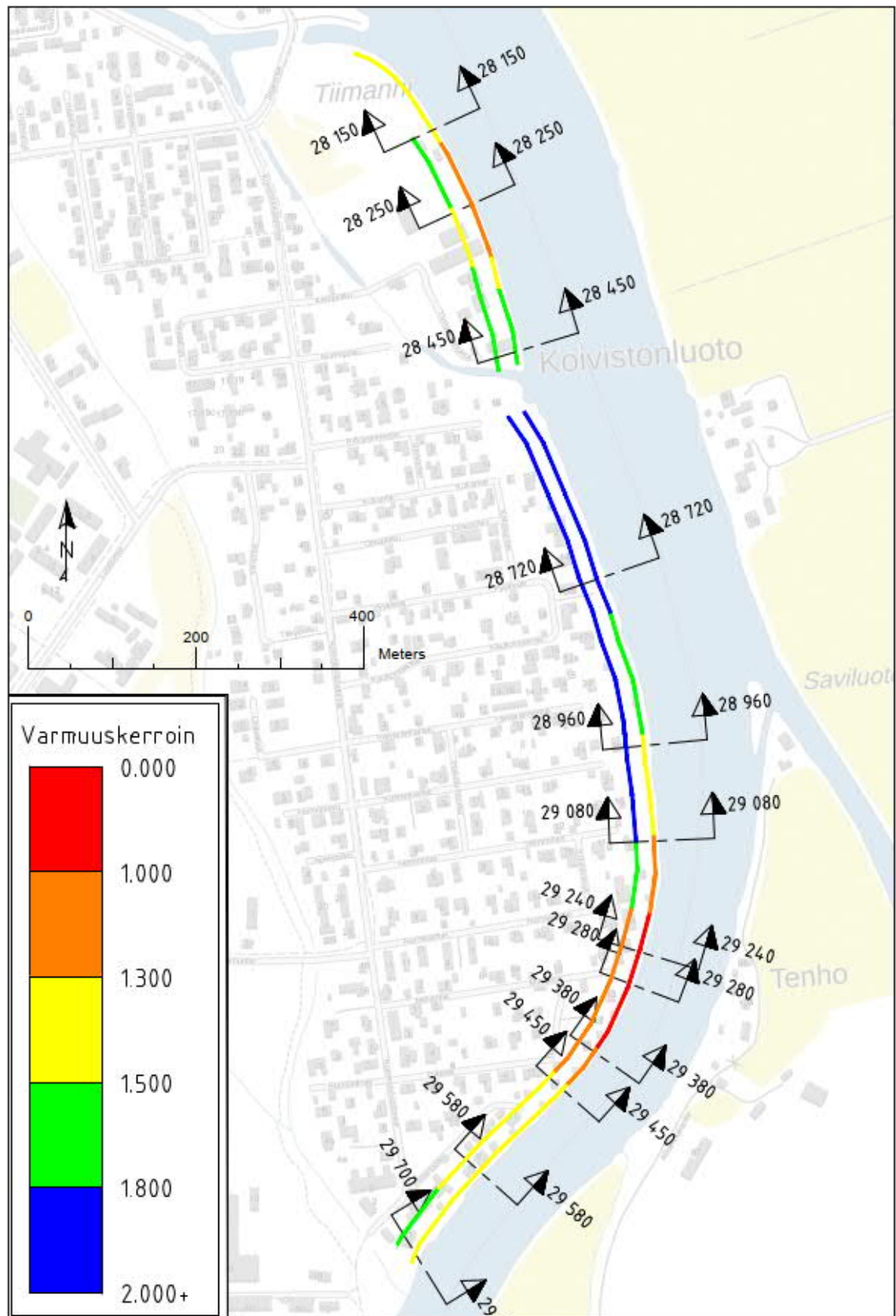
3D-laskennassa määritetyt kokonaisvarmuudet ovat suurempia jokaisen laskentaleikkauksen kohdalla mitä vastaavat 2D-laskennan varmuudet. 3D-laskennassa alhaisin määritetty kokonaisvarmuus sijoittuu paalun 29 280 kohdalle. Kyseinen laskentakohde oli Koivistonluodossa ainoa, josta määritettiin joen törmän harjalta joen syvänneuraan ulottuville liukupinnoille alle yhden kokonaisvarmuuksia. Paaluvälin muista laskentakohteista löytyi myös alle yhden kokonaisvarmuuksia, mutta ne sijaitsivat kokonaan vedenpinnan alapuolella joen syvänneurassa ja olivat kooltaan pienempiä, mitä taulukossa esitetty. Taulukosta huomataan kuinka liukuvan maa-aineksen tilavuus kasvaa paalulukeman kasvaessa. Tämä johtuu siitä, että joen syvänneura loittonee paalulukeman kasvaessa (kuva 29). Tällöin liukupinnat pitenevät ja levenevät, mikä samalla kasvattaa tilavuutta.

Kuvassa 30 on esitetty 3D-laskennan tulos paalun 29 280. Kyseessä on pallon muotoinen liukupinta. Kuvassa näkyy, kuinka taulukoihin on mitattu liukupinnan leveys. Liukupinta on lähes yhdenmukainen kuin 2D-laskennassa ympyrämuotoisella määritetty (kuva 28).



Kuva 30. 3D-laskenta jokipaalun 29 280 kohdalta. Pallon muotoisen liukupinnan kokonaisvarmuus 0,98, liukupinnan leveys 30 metriä ja liukuvan maa-aineksen tilavuus 1100 kuutiota.

Kuvassa 31 on esitetty Koivistonluodon 2D-laskennan varmuuskertoimet värien avulla kartalla. Uoman puoleinen viiva kuvaa pienimmän varmuuskertoimen saavan liukupinnan arvoa ja uomasta kauempana sijaitseva viiva kuvaa rakennuksilta lähtevän liukupinnan varmuuskertoimen arvoa. Molemmat arvot on laskettu käyttäen keskiveden korkeutta, avointa tilaa ja ympyrän muotoista liukupintaa, eli uoman puoleisen viivan arvoja kuvaa esimerkiksi taulukon 11 rivin keskivesi, avoin, ympyrä -arvot ja taemman viivan arvoja kuvaavat rivin F nykyiseltä rakennukselta, keskivesi, avoin, ympyrä -arvot. Lisäksi kuvassa näkyvät Koivistonluodon laskentaleikkaukset, joiden perusteella värit on määritetty. Laskentaleikkausten välisellä alueella varmuuskerroin on arvioitu lähimpien laskentaleikkausten varmuuskerrointen, sekä uoman ja törmän geometrian perusteella.



Kuva 31. Koivistonluodon laskentapoikkileikkaukset, sekä pienimpien ja rakennuksilta lähtevien liukupintojen varmuuskertoimet esitettynä värein kartalla (sisältää Maanmittauslaitoksen Taustakarttasarjan 01/2021 aineistoa).

6.2 Harmaalinna

Harmaalinnan 2D-laskennan tulokset on esitetty taulukossa 14. Avoimen tilan tarkasteluissa pienimmän varmuuskertoimen arvon saavat liukupinnat on laskettu kahden ja kymmenen metrin etäisyyksiltä joen törmän harjasta mitattuna, lukuun ottamatta jokipaalun 31 650 laskentaa. Jokipaalun 31 650 kohdalla Harmaalinnan puoleinen joen törmä on loiva ja sen johdosta leikkauksesta on määritetty ainoastaan alhaisimman kokonaisvarmuuden saava liukupinta. Eri etäisyyksiltä (2 m ja 10 m) lähtevät liukupinnat on esitetty liitteissä samassa tulosteessa. Harmaalinnan alueella avoimen tilan tarkasteluiden kokonaisvarmuudet vaihtelivat keskivedentilanteessa 2 metrin etäisyyksiltä lähtevillä liukupinnoilla välillä 0,90-1,20 ja 10 metrin etäisyyksiltä välillä 1,30-1,67. 3D-laskenta suoritettiin laskentaleikkauksien 30 600 ja 31 450 kohdilta.

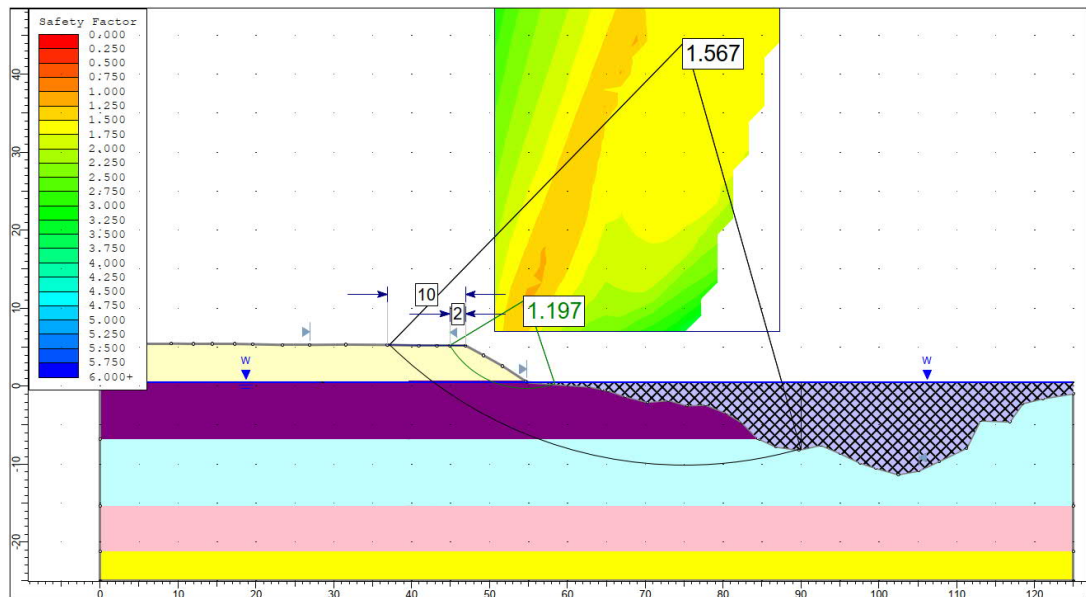
Useissa avoimen tilan eri mitoittavien tilanteiden mukaisissa laskentatapauksissa 2 metrin etäisyydeltä joen törmästä lähtevien liukupintojen kokonaisvarmuudet ovat lähes samansuuruisia. Tämä johtuu siitä, että lyhyet liukupinnat leikkautuvat ulos joen törmän alareunasta, eikä vedenpinnan lasku vaikuta törmän kyseiseen osaan. Esimerkiksi paalun 31 000 tapauksessa kahden metrin etäisyyksiltä lähtevien ympyränmuotoisten liukupintojen kokonaisvarmuuden erotus on 0,03 keskiveden tapauksesta nopean vedenpinnan laskuun verrattuna, kun sama erotus kymmenestä metristä lähtevillä liukupinnoilla on 0,15.

Taulukko 14. Kokonaisvarmuuskertoimet ja turvalliset rakentamisetäisyydet ($F \geq 1.8$) Harmaalinna-alueelta. Tähdellä (*) merkityt laskentatulokset ovat mukana liitteenä olevissa tulosteissa.

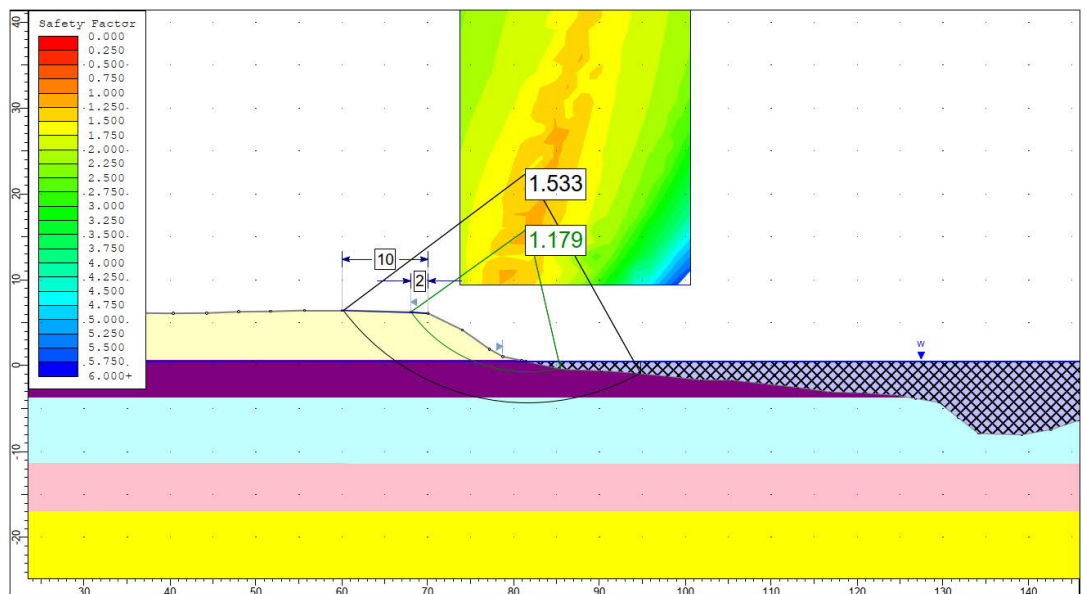
Mitoitustilanne, menetelmä ja liukupinnan muoto	Paalulukema						
	30 600	30 880	31 000	31 140	31 450	31 500	31 650
Keskivesi, avoin, ympyrä, 2 m	1,20*	1,18	1,08	1,05	0,90*	1,14	1,46*
Keskivesi, avoin, ympyrä, 10 m	1,57*	1,53	1,61	1,56	1,30*	1,42	
Alivesi, avoin, ympyrä, 2 m	1,22	1,24	1,14		0,94	1,15	1,42
Alivesi, avoin, ympyrä, 10 m	1,50	1,48	1,59		1,28	1,37	
Nopea vedenpinnan lasku, avoin, ympyrä, 2 m	1,20*	1,13	1,05		0,88*	1,06	1,33
Nopea vedenpinnan lasku, avoin, ympyrä, 10 m	1,46*	1,42	1,50		1,20*	1,31	
$F \geq 1.8$, keskivesi, avoin, ympyrä	30 m	20 m	14 m	22 m	34 m*	28 m	26 m
F nykyiseltä rakennukselta, keskivesi, avoin, ympyrä	$F > 2$	$F > 2$	$F > 2$	$F > 2$	1,98*	2,06	1,64*
Keskivesi, suljettu, ympyrä	1,42	1,43	1,49	1,36	1,27	1,31	1,17
Alivesi, suljettu, ympyrä	1,35	1,39			1,20	1,22	
Nopea vedenpinnan lasku, suljettu, ympyrä	1,33	1,40			1,20	1,23	
Keskivesi, avoin, vapaa, 2 m	1,22	1,12	1,04	1,00	0,82	1,05	1,42
Keskivesi, avoin, vapaa, 10 m	1,44	1,41	1,41	1,35	1,14	1,30	
Alivesi, avoin, vapaa, 2 m	1,33	1,12	1,08		0,82		1,40
Alivesi, avoin, vapaa, 10 m	1,38	1,40	1,42		1,13		
Nopea vedenpinnan lasku, avoin, vapaa, 2 m	1,19	1,08	0,94		0,83		1,31
Nopea vedenpinnan lasku, avoin, vapaa, 10 m	1,34*	1,33	1,32		1,07		
$F \geq 1.8$, keskivesi, avoin, vapaa	35 m	25 m	18 m	27 m	42 m	34 m	29 m
F nykyiseltä rakennukselta, keskivesi, avoin, vapaa	$F > 2$	$F > 2$	$F > 2$	$F > 2$	1,80	1,89	1,60
Keskivesi, suljettu, vapaa	1,36	1,39	1,42	1,30	1,21	1,25	1,16

Harmaalinna-alueella joen törmän ja uoman geometria ovat likimäärin samankaltaisia paaluvälillä 30 500-31 600. Tästä johtuen taulukossa 14 esitetyt kokonaisvarmuudet eivät poikkea suuresti toisistaan. Paalun 30 600 laskentaleikkaus oli ainoa, missä 10 metrin etäisyydeltä lähtevä liukupinta leikkautui ulos vasta joen syvänneaurasta (kuva 32). Paalun

30 880 kohdalla syväneura on jo kauempana, eikä 10 metristä lähtevä liukupinta yllä syväneuraan saakka (kuva 33). Varmuuskertoimet ovat kuitenkin samaa suuruusluokkaa.

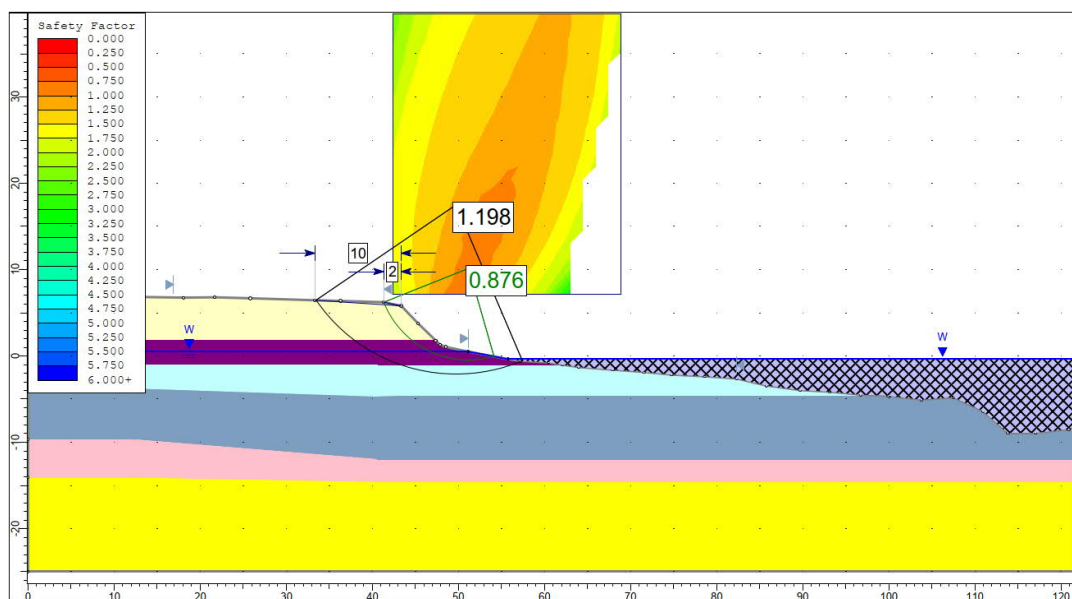


Kuva 32. Kokonaisvarmuudet 2 ja 10 metrin etäisyyksiltä lähteille ympyrän muotoisille liukupinnoille jokipaalun 30 600 kohdalla. Keskivedentilanne ja avoimen tilan tarkastelu.



Kuva 33. Kokonaisvarmuudet 2 ja 10 metrin etäisyyksiltä lähteille ympyrän muotoisille liukupinnoille jokipaalun 30 880 kohdalla. Keskivedentilanne ja avoimen tilan tarkastelu.

Alhaisimmat kokonaisvarmuudet määritettiin paalun 31 450 leikkauksesta. Tämä johtuu kahdesta asiasta, kyseisen poikkileikkauksen kohdalla joen törmä on jyrkimmillään ja savikerros on lähempänä maanpintaa mitä muualla Harmaalinnessa. Avoimen tilan tarkastelussa nopean vedenpinnanlaskun jälkeen saatiin kuvan 34 mukaiset kokonaisvarmuudet. Leikkauksen 31 450 kohdalla tapahtui vuonna 2019 sortuma, joka arvioidusti vastaa suuruudeltaan kuvassa 34 kahden metrin etäisyydeltä lähtevää liukupintaa.



Kuva 34. Kokonaisvarmuudet 2 ja 10 metrin etäisyyksiltä lähteville ympyrän muotoisille liukupinnoille jokipaalun 31 450 kohdalla. Nopea vedenpinnan lasku ja avoimen tilan tarkastelu.

Harmaalinnessa kokonaisvarmuudet rakennuksilta lähteville liukupinnoille olivat riittäviä ($\geq 1,8$) leikkausta 31 650 lukuun ottamatta ($F=1,60$). Paalun 31 650 kohdalla Harmaalinna puoleinen joen törmä on loiva verrattuna muualle, eikä näin ollen tilanne ole vaarallinen. Joen törmästä mitattu etäisyys rakennukselle on 17 metriä, kun etäisyys kokonaisvarmuuden 1,8 saavuttamiseksi on 26 metriä.

Erosio on voimakkainta paaluvälillä 30 500-30 800. Paalun 30 600 laskennasta havaittiin, että 10 metrillä lähtevä liukupintaa ulottuu syvänneuraan asti, minne myös eroosio painottuu edellä mainitulla paaluvälillä. Tämä voi alentaa pidempien liukupintojen varmuuksia tulevaisuudessa. Taulukossa 14 esitettyjen tulosten lisäksi

paalulta 30 600 suoritettiin laskenta, missä joen syvännearaan mallinnettiin tapahtuvaksi metri eroosiota. Tällöin avoimen tilan tarkastelussa keskiveden tilanteessa 10 metristä lähtevän ympyrän muotoisen liukupinnan kokonaisvarmuus muuttui 1,57→1,42. Vastaavasti kahden metrin eroosiolla kokonaisvarmuus muuttui 1,57→1,33.

3D-laskennan tulokset Harmaalinnasta on esitetty taulukossa 15. Laskentakohteet sijoittuivat laskentaleikkausten 30 600 ja 31 450 kohdille. Kyseisten leikkausten vastaavat 2D-laskentojen tulokset on myös esitetty taulukossa. Mittausaineistoon perustuvien tarkasteluiden kokonaisvarmuudet vaihtelivat 2 metrin etäisyyksiltä lähtevillä liukupinnoilla välillä 0,95-1,26 ja 10 metrin etäisyyksiltä välillä 1,22-1,71.

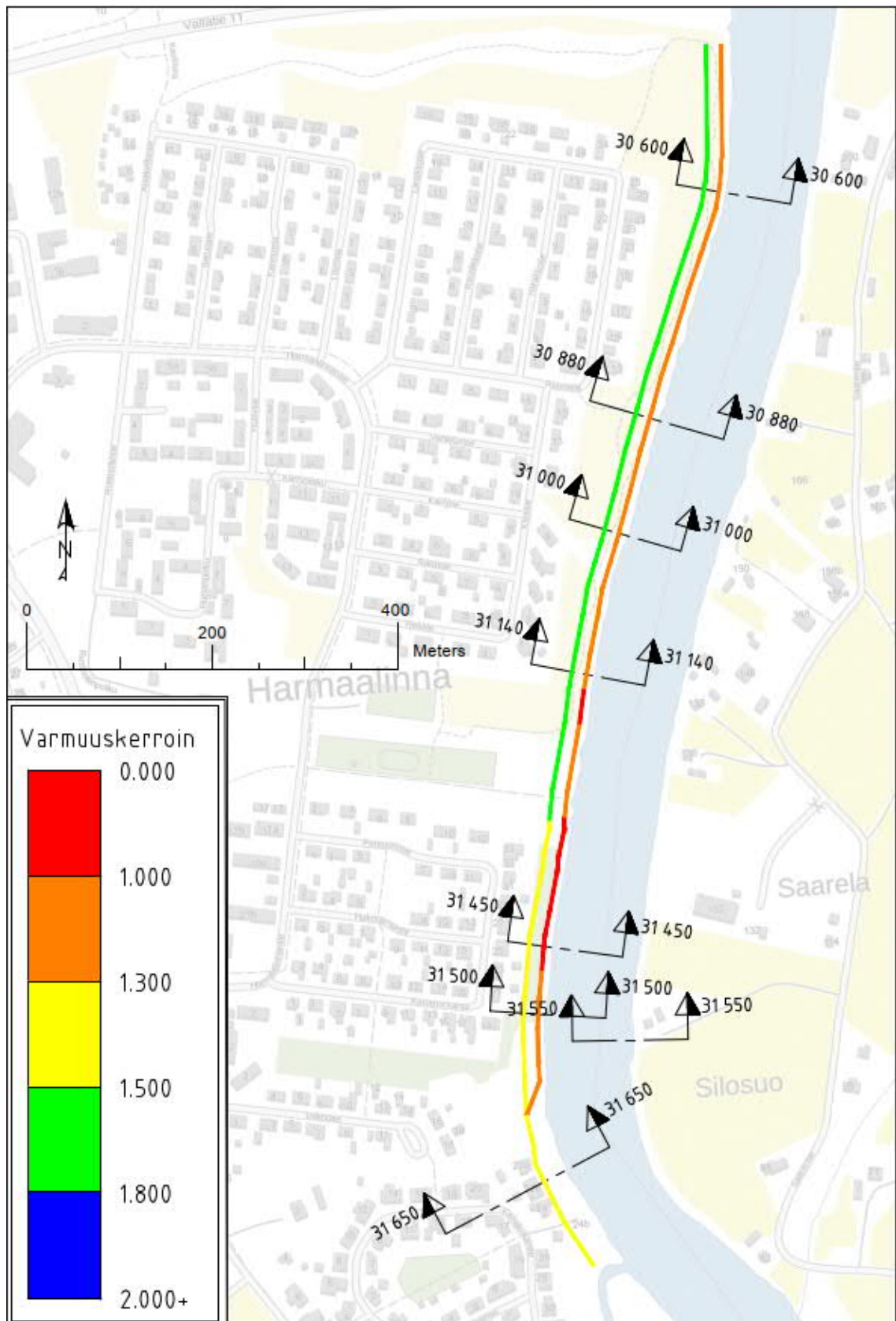
Taulukko 15. Harmaalinnan 3D-laskentakohteiden kokonaisvarmuudet (F), liukuvan maa-aineksen tilavuudet (m³) ja liukupintojen leveydet (m). Tähdellä (*) merkityt laskentatulokset ovat mukana liitteenä olevissa tulosteissa.

Laskentamenetelmä	Paalulukema					
	30 600			31 450		
	F	m ³	m	F	m ³	m
3D Ellipsoidi (10 m)	1,64*	15140	60	1,22*	5100	45
3D Ellipsoidi (2 m)	1,10*	620	25	0,95	520	25
3D Pallo (10 m)	1,71	18020	65	1,30	3950	35
3D Pallo (2 m)	1,26	630	20	1,01	400	20
3D Ellipsoidi (10 m) (2D geometria)	1,59	25860	80	1,13	9140	85
3D Ellipsoidi (2 m) (2D geometria)	1,11	620	35	0,78	430	35
3D Pallo (10 m) (2D geometria)	1,68	22830	75	1,26	2130	35
3D Pallo (2 m) (2D geometria)	1,23	290	15	0,95	250	15
2D Ympyrä (10 m)	1,57			1,30		
2D Ympyrä (2 m)	1,20			0,90		
2D Vapaa (10 m)	1,44			1,14		
2D Vapaa (2 m)	1,22			0,82		

Taulukosta huomataan, että leikkauksen 30 600 kohdalla liukuvan maa-aineksen tilavuus on huomattavasti suurempi, mitä leikkauksen 31 450 kohdalla. Tähän syynä on joen syvännearan sijainti (vertaa kuvia 32 ja 34). Leikkauksen 30 600 kohdalla 3D-laskennassa määritetyt 10 metrin etäisyydeltä joen törmästä alkavat liukupinnat ulottuivat joen syvännearaan.

Kuvassa 35 on esitetty varmuuskertoimet värien avulla kartalla. Uoman puoleinen viiva kuvaa kahden metrin etäisyydeltä törmän harjasta lähtevän liukupinnan varmuuskertoimen arvoa ja uomasta kauempana sijaitseva viiva kuvaa 10 metrin

etäisyydeltä lähtevän liukupinnan varmuuskertoimen arvoa. Molemmat arvot on laskettu käyttäen keskiveden korkeutta, avointa tilaa ja ympyrän muotoista liukupintaa, eli uoman puoleisen viivan arvoja kuvaa taulukon 14 rivin keskivesi, avoin, ympyrä, 2 m -arvot ja taemman viivan arvoja kuvaavat rivin keskivesi, avoin, ympyrä, 10 m -arvot. Lisäksi kuvassa näkyvät Harmaalinnan laskentaleikkaukset, joiden perusteella värit on määritetty. Laskentaleikkausten välisellä alueella varmuuskerroin on arvioitu lähimpien laskentaleikkausten varmuuskerrointen, sekä uoman ja törmän geometrian perusteella. Kuvassa Harmaalinnan eteläosassa on vain yksi viiva, koska siellä törmän geometria on loivempi, mitä muualla. Tästä johtuen eri etäisyyksiltä lähteviä liukupintoja ei pysty määrittämään samaan tapaan, mitä muualla Harmaalinnassa. Eteläosassa viiva kuvaa pienimmän varmuuskertoimen saaneen liukupinnan arvoa.



Kuva 35. Hamaalinnan laskentapoikkileikkaukset, sekä kahden ja kymmenen metrin etäisyyksiltä joen törmästä mitattuna lähtevien liukupintojen varmuuskertoimet esitettynä värein kartalla (sisältää Maanmittauslaitoksen Taustakarttasarjan 01/2021 aineistoa).

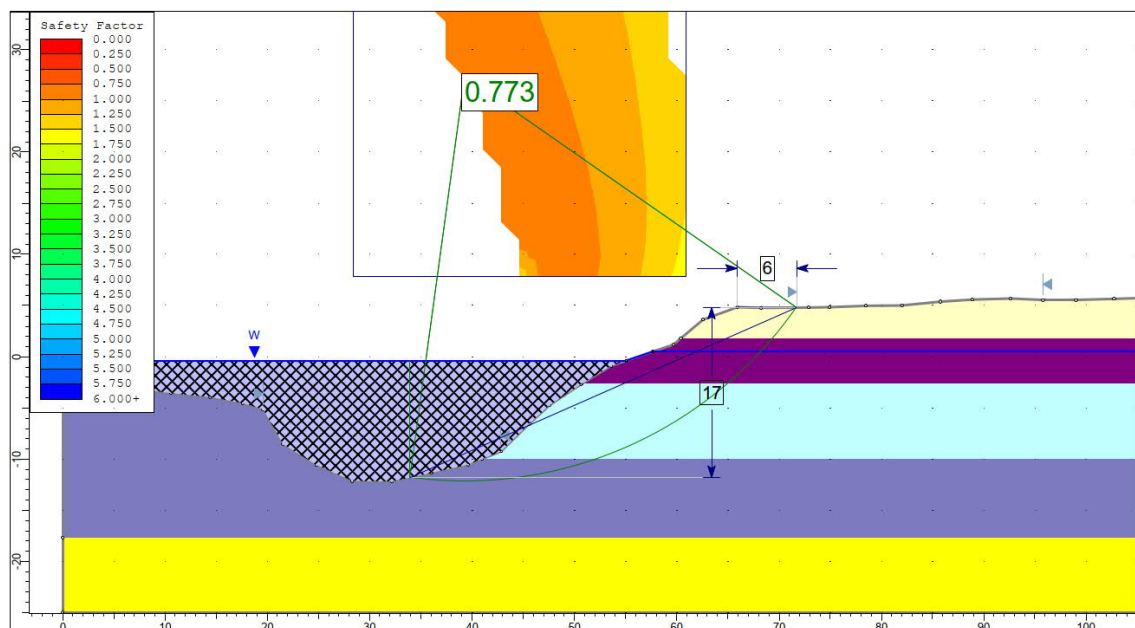
6.3 Takaisinlaskenta (Ulvila)

Ulvilan puoleisen sortuman 2D-takaisinlaskennan tulokset on esitetty taulukossa 16. Kyseisestä laskentaleikkauksesta ei laskettu kaikkia edellisissä taulukoissa esitettyjä tilanteita, koska Kokemäenjoen Ulvilan puoleinen törmä on rajattu tutkimusalueen ulkopuolelle. Lisäksi oli tiedossa, että kyseinen sortuma tapahtui juuri nopean vedenpinnan laskun jälkeen.

Taulukko 16. 2D-takaisinlaskennan kokonaisvarmuuskertoimet Kokemäenjoen Ulvilan puoleisen sortuman kohdalta. Tähdellä (*) merkityt laskentatulokset ovat mukana liitteenä olevissa tulosteissa.

Mitoitustilanne, menetelmä ja liukupinnan muoto	Paalu 31 550
Keskivesi, avoin, ympyrä	0,84*
Nopea vedenpinnan lasku, avoin, ympyrä	0,77*
Keskivesi, suljettu, ympyrä	0,80
Nopea vedenpinnan lasku, suljettu, ympyrä	0,75
Keskivesi, avoin, vapaa	0,81
Nopea vedenpinnan lasku, avoin, vapaa	0,73*
Keskivesi, suljettu, vapaa	0,77
Nopea vedenpinnan lasku, suljettu, vapaa	0,73

Avoimen tilan tarkasteluista määritettiin nopean vedenpinnan laskun jälkeen kokonaisvarmuudet 0,77 ympyrän muotoisella liukupinnalla (kuva 36) ja 0,73 vapaalla liukupinnalla. Näin alhaisia kokonaisvarmuuksia ei tutkimusalueilla laskennallisesti havaittu. Tarkasteluissa liukupinnan määritettiin lähtevän 6 metrin etäisyydeltä joen törmästä ja leikkautuvan ulos syvänneuran pohjalta. Tämä vastaa luotausten ja laserkeilausten perusteella tapahtunutta sortumaa.

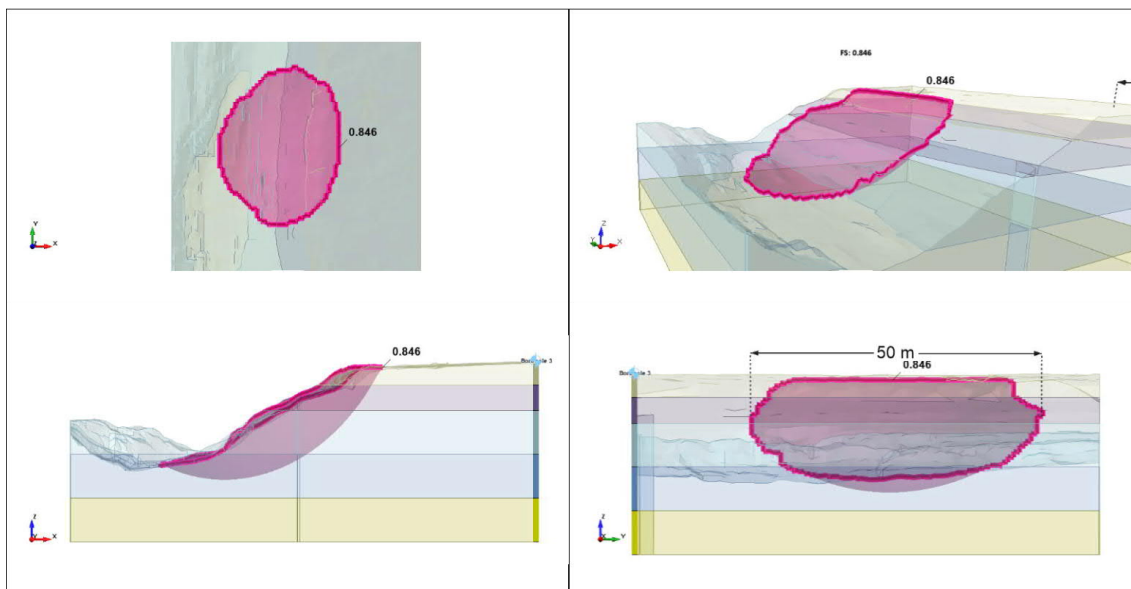


Kuva 36. Takaisinlaskenta jokipaalun 31 550 kohdalta. Nopea vedenpinnan lasku, avoin tila ja ympyränmuotoinen liukupinta. Kokonaisvarmuus 0,77.

Taulukossa 17 on esitetty 3D-takaisinlaskennan tulokset. 3D-laskennassa määritetyt liukupinnat vastasivat pituuksiltaan 2D-laskennassa määritettyjä, lisäksi 3D-laskennassa määritettyjen liukupintojen leveydet vastasivat mittausaineistojen perusteella todellista sortumaa. Kuvassa 37 on esitetty ellipsoidin mallisella liukupinnalla saatu tulos.

Taulukko 17. 3D-takaisinlaskennan kokonaisvarmuuskertoimet (F), liukuvan maa-aineksen tilavuudet (m³) ja liukupintojen leveydet (m) Ulvilan puoleisen sortuman kohdalta. Tähdellä (*) merkityt laskentatulokset ovat mukana liitteenä olevissa tulosteissa.

Laskentamenetelmä	Paalu 31 550		
	F	m ³	m
3D Ellipsoidi*	0,85	7470	50
3D Pallo*	0,90	7270	45
2D Ympyrä	0,84		
2D Vapaa	0,81		



Kuva 37. 3D-takaisinlaskenta jokipaalun 31 550 kohdalta. Ellipsoidin muotoisen liukupinnan kokonaisvarmuus 0,85, liukupinnan leveys 50 metriä ja liukuvan maamassan tilavuus 7470 kuutiota.

6.4 Laskentatulosten yhteenveto

2D-laskennan avoimen tilan tarkasteluissa alhaisimmat kokonaisvarmuudet määritettiin nopean vedenpinnan laskun tilanteessa. Nopean vedenpinnan laskun jälkeen kokonaisvarmuudet ovat keskimäärin 10 % pienempiä, mitä keskiveden tilanteessa. Vastaavasti aliveden tilanteessa kokonaisvarmuudet ovat keskimäärin 1,5 % pienempiä kuin keskiveden tilanteessa. Koivistonluodossa vapailla liukupinnoilla Morgenstern-Pricen menetelmällä saadut kokonaisvarmuudet ovat keskimäärin 5 % pienempiä, mitä ympyrämuotoisilla liukupinnoilla Bishopin menetelmällä saadut kokonaisvarmuudet. Harmaalinnassa vastaava ero on 9 %. Harmaalinnan osalta varmuuskerroinero on laskettu 10 metrin etäisyyksiltä lähteville liukupinnoille. Tämä selittää miksi varmuuskerroinero on suurempi Harmaalinnassa, mitä Koivistonluodossa. Harmaalinnasta verratut liukupinnat ovat pidempiä mitä Koivistonluodossa ja tulosten perusteella on havaittavissa, että varmuuskerroinero kasvaa Bishopin ympyrän ja Morgenstern-Pricen vapaan liukupinnan välillä suuremmaksi liukupinnan pituuden kasvaessa.

Suljetun tilan tarkasteluja ei tehty kaikista laskentaleikkauksista yhtä kattavasti, mitä avoimen tilan tarkasteluja. Koivistonluodossa suljetussa tilassa ympyrän muotoisilla

liukupinnoilla aliveden mukaisen tilanteen kokonaisvarmuuksien havaittiin olevan keskimäärin 8 % pienempiä kuin keskiveden tilanteessa. Alivedentilanteen ja nopean vedenpinnalaskun vastaava varmuuskerroinero oli vain 0,2 %. Tämän vuoksi suljetun tilan tarkasteluita ei enää Harmaalinnan osalta tehty yhtä kattavasti, mitä Koivistonluodossa tehtiin. Lisäksi suljetun tilan tarkastelu on lähtökohtaisesti tarkoitettu lyhyen ajan vakavuuden tarkastelemiseen, mikä ei ollut tämän työn ensisijainen tarkoitus.

3D-laskennan tulokset mukailivat 2D-laskentaa. Keskimääräisesti 3D-laskennassa määritetyt kokonaisvarmuudet olivat suurempia, mitä 2D-laskennan. Taulukossa 18 on esitetty varmuuskerroineroja. Taulukossa 2D-laskennan ympyrän muotoista liukupintaa on verratta 3D-laskennan pallon muotoiseen ja vastaavasti vapaan muotoista liukupintaa ellipsoidiin. Taulukossa on eroteltu mitattuun geometriaan perustuva ero, sekä 2D-laskennasta 3D-muotoon muunnetun geometrian ero. Mitattu geometria perustuu luotaus- ja laserkeilausaineistoihin. Taulukosta huomataan, että varmuuskerroinero on suurempi mitattuun geometriaan perustavan 3D-laskennan ja 2D-laskennan välillä. Tämän selittävät joen paikalliset syvänteet, jotka eivät ole jatkuvia. 3D-laskenta, joka on suoritettu 2D-laskennan mukaisella geometrialla olettaa leikkauksen kohdalla vallitsevan geometrian jatkuvaksi. Mitattuun geometriaan perustavassa laskennassa syvänteet ovat paikallisia ja ne muodostavat koveria muotoja. Kuten luvussa 2.4 todettiin, niin varmuuskerroinero on suurempi koverilla luiskilla kuperiin verrattaessa.

Taulukko 18. 3D- ja 2D-laskennan varmuuskerroinerot.

Geometria	3D Pallo>2D Ympyrä	3D Ellipsoidi>2D Vapaa
Mitattu	6,6 %	9,7 %
2D-geometriasta jatkettu	5,8 %	4,1 %
Yhteensä	6,2 %	7,0 %

Yksi 3D-laskennan hyödyistä on tuloksena saatava sortuman koko. 2D-laskennassa voidaan määrittää liukupinnan pituus, minne asti liukupintaa ulottuu. 3D-laskennan avulla pystyttiin määrittämään kuinka laaja mahdollinen sortuma todellisuudessa on. Tarkasteluissa määritetyt pienimmät sortumat olivat tilavuudeltaan noin 250 m³, kun taas erimerkiksi takaisinlaskennassa määritetty sortuma oli tilavuudeltaan yli 7000 m³. Eri vuosien mittausaineistojen vertailun perusteella takaisinlaskennassa määritetty sortuma vastasi kooltaan todellista sortumaa.

Verrattaessa Koivistonluodon tuloksia Ulvilan puoleiseen takaisinlaskentaan huomataan, että alhaisimmat kokonaisvarmuudet Koivistonluodossa ovat hyvin lähellä Ulvilan sortuman aikaisia varmuuksia. Taulukossa 19 on esitetty ympyrän muotoisilla liukupinnoilla määritetyt avoimen tilan kokonaisvarmuudet nopean vedenpinnan laskun tilanteessa Ulvilan puoleisen sortuman kohdalta ja Koivistonluodosta laskentaleikkauksilta 29 240, 29 280 ja 29 380. Taulukosta huomataan, että paaluilla 29 240 ja 29 280 kokonaisvarmuudet ovat lähes Ulvilassa tapahtuneen sortuman aikaisella tasolla.

Taulukko 19. Koivistonluodon ja Ulvilan sortuman varmuuskerroinerot.

Laskentaleikkaus	Kokonaisvarmuus F	Varmuuskerroinerot (Koivistonluoto-Ulvila)
31 550 (Ulvila)	0,77	
29 240 (Koivistonluoto)	0,82	$0,82-0,77= 0,05$
29 280 (Koivistonluoto)	0,81	$0,81-0,77= 0,04$
29 380 (Koivistonluoto)	0,91	$0,91-0,77= 0,14$

Todellinen tilanne nykyhetkellä voi olla tuloksissa esitettyä heikompi varsinkin voimakkaan eroosion alueella. Tehdyt luotauksen ovat vuosilta 2010 ja 2014, joten niiden perusteella nykyhetken tilannetta on hankala määrittää. Tilanteen kehittymistä voidaan arvioida kyseisten luotausten perusteella, sekä verrata varovasti edellä mainittuja luotaustuloksia vuoden 2021 luotaukseen. Vuonna 2021 tehty luotaus antaa kuitenkin niin epätarkan kuvan uoman muutoksista, että esimerkiksi pengertasanteen vetäytymistä siitä on vaikea arvioida.

7 STABILITEETTIA PARANTAVAT TOIMENPITEET

Seuraavaksi tarkastellut stabiliteettia parantavat toimenpiteet ovat stabiliteetilaskentaan pohjautuvia. Varsinaisia korjaussuunnitelmia ei tässä työssä laadittu. Laskennan avulla tarkasteltiin, kuinka joen törmään tehtävä kevennysleikkaus, joen syväenneuraan louheesta tehtävä tukipenger, joen rantaan asennettava teräsponttiseinä, sekä maanaulaus parantavat stabiliteettia. Koivistonluodossa stabiliteettia parantavien toimenpiteiden vaikutusta tutkittiin paaluvälillä 29 100-29 800, missä laskennan perusteella stabiliteetti oli heikoin. Toimenpiteiden vaikutuksia tarkasteltiin laskentaleikkauksilla 29 240, 29 280, 29 380, 29 450 ja 29 580. Harmaalinnassa stabiliteettia parantavien toimenpiteiden vaikutuksia tarkasteltiin laskentaleikkauksilla 30 600, 31 000 ja 31 450. Laskentaleikkauksissa tarkasteltuja parannuksia voidaan Harmaalinnassa käyttää paaluvälillä 30 600- 31 600, koska joen törmä on geometrialtaan varsin samankaltainen kyseisellä paaluvälillä. Tämän takia parantavien toimenpiteiden vaikutuksia ei tarkasteltu Harmaalinnan jokaisella laskentaleikkauksella. Parantavien toimenpiteiden vaikutuksia tarkasteltiin keskivedentilanteessa ympyränmuotoisilla liukupinnoilla.

Koivistonluodossa tarkasteltiin louheesta rakennettavan tukipenkereen, maanaulauksen ja ponttiseinän vaikutuksia stabiliteettiin. Koivistonluodossa tarkastellulla paaluvälillä ei ole tilaa tehdä suuria kevennysleikkauksia, joten niitä ei erikseen tarkasteltu. Kohtuullisen kokoisella tukipenkereellä ei saatu tarkastelluilla laskentaleikkauksilta rakennukselta vaadittavaa kokonaisvarmuutta ($F \geq 1,8$) täytettyä, joten päätettiin tutkia myös maanaulauksen ja ponttiseinän vaikutuksia. Jos tukipenkereen avulla olisi haluttu saavuttaa rakennuksilta vaadittu kokonaisvarmuus, niin joen poikkileikkauspinta-ala olisi pienentynyt huomattavasti. Nykyisellään joen poikkileikkauspinta-ala on noin 400 m² paaluvälillä 29 100-29 800 ja louhetta olisi tarvittu vähintään 100 m² leikkausta kohden, mikäli olisi haluttu saavuttaa kokonaisvarmuus 1,8. Tämä voisi vaikuttaa eroosioon vastakkaisella rannalla ja sen myötä myös heikentää alueen stabiliteettia. Määritettyjen louhepenkereiden geometria vaihtelee hieman laskentaleikkausten välillä, johtuen joen uoman geometrian vaihtelusta. Louhepengertä on optimoitu joen uoman geometrian mukaan niin, että louhetta kuluisi mahdollisimman vähän. Ehtona oli, että tukipenkereellä saavutettaisiin kokonaisvarmuus 1,5, mikä oli vaatimus rakennusten ulkopuolisille liukupinnoille. Maanaulauksen ehtona oli, että saavutetaan rakennuksilta vaadittava kokonaisvarmuus 1,8. Teräsponttiseinä puolestaan vietiin tiiviiseen pohjamaahan asti,

jotta se ei lähde mahdollisen liukupintasortuman mukaan. Kun ponttiseinä upotettiin kaksi metriä tiiviiseen pohjamaahan, niin kokonaisvarmuus 1,8 täyttyi selvästi.

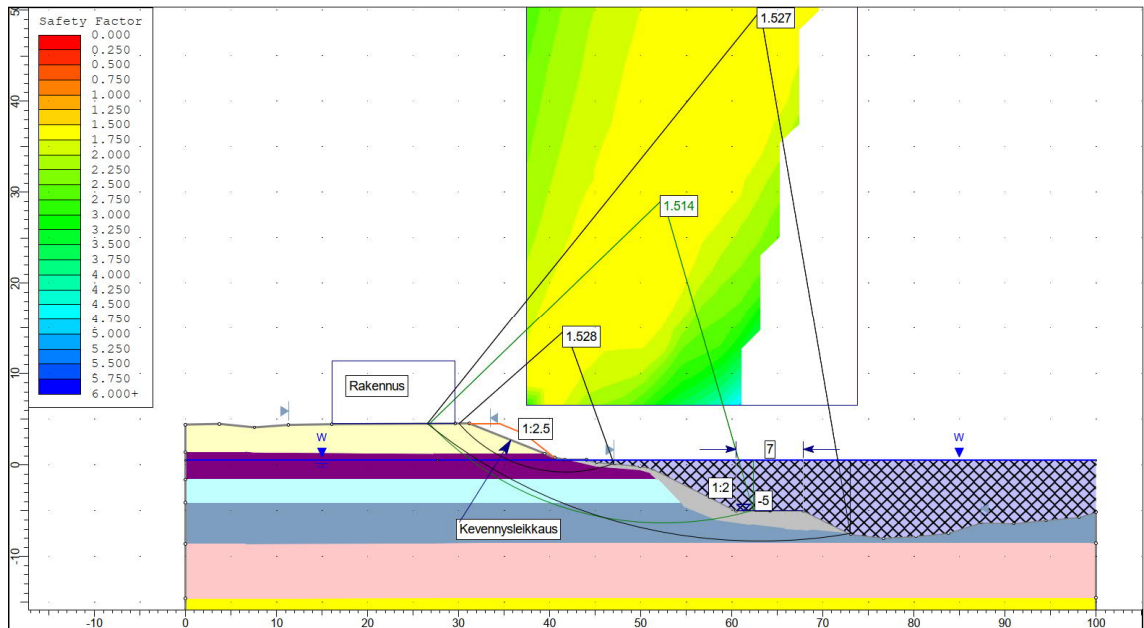
Taulukossa 20 on esitetty parantavien toimenpiteiden vaikutuksia Koivistonluodossa. Taulukossa on esitetty alhaisin kokonaisvarmuus (F_{\min}), kokonaisvarmuus rakennukselta lähtevälle liukupinnalle (F_{rak}), louhepenkereen osalta louheen määrä neliöinä poikkileikkauksessa, sekä maanaulojen ja teräsponttien pituudet. Lisäksi taulukossa on aiemmin laskennassa määritetyt nykyistä tilannetta kuvaavat kokonaisvarmuudet.

Taulukko 20. Stabiiliteetin parantaminen Koivistonluodossa.

Paalulukema	Nykytila		Louhepengeri			Maanalaus			Ponttiseinä		
	F_{\min}	F_{rak}	F_{\min}	F_{rak}	m^2	F_{\min}	F_{rak}	m	F_{\min}	F_{rak}	m
29 240	0,98	1,13	1,50	1,55	49	1,83	1,83	15	2,19	2,19	14
29 280	0,93	1,10	1,51	1,53	42	1,80	1,80	15	2,31	2,31	14
29 380	1,02	1,07	1,51	1,51	40	1,85	1,85	15	2,53	2,53	17
29 450	1,34	1,35	1,50	1,53	23	1,97	1,97	12	2,09	2,09	17
29 580	1,30	1,30	1,56	1,60	6	1,91	1,91	10	3,05	3,05	17

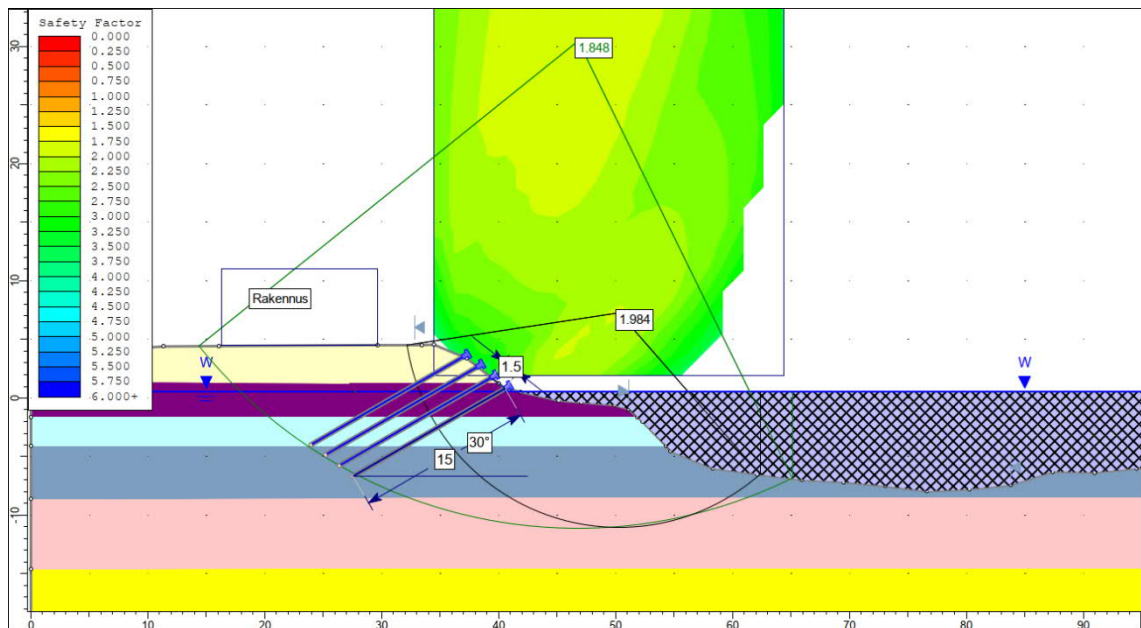
Taulukosta huomataan, että louhepenkereen tapauksessa alhaisimmat kokonaisvarmuudet ovat hyvin lähellä rakennuksilta lähtevien liukupintojen kokonaisvarmuuksia. Maanaulauksen ja ponttiseinän tapauksissa rakennukselta lähtevä liukupinta on samalla pienimmän kokonaisvarmuuden omaava liukupinta ($F_{\min}=F_{\text{rak}}$). Kuvissa 38, 39 ja 40 on esitetty stabiiliteettia parantavien toimenpiteiden vaikutuksia laskentaleikkauksen 29 380 kohdalla.

Louhepenkereen tapauksessa joen törmään on myös tehty pieni kevennysleikkaus, jossa törmä on loivennettu kaltevuuteen 1:2,5. Maanpinta ennen kevennysleikkausta on esitetty kuvassa 38 oranssilla viivalla. Tämän avulla pengertasanteen päälle tarvittavan louheen määrä on saatu minimoitua. Pengertasanteen päällä on noin 0,5 metriä paksu louhekerros, joka parantaa lyhyiden liukupintojen kokonaisvarmuutta, sekä eroosiokestävyyttä. Paksu louhekerros pengertasanteen päällä huonontaisi pitkien liukupintojen kokonaisvarmuutta, koska louhe olisi pitkien liukupintojen suhteen niitä kaatavalla puolella.



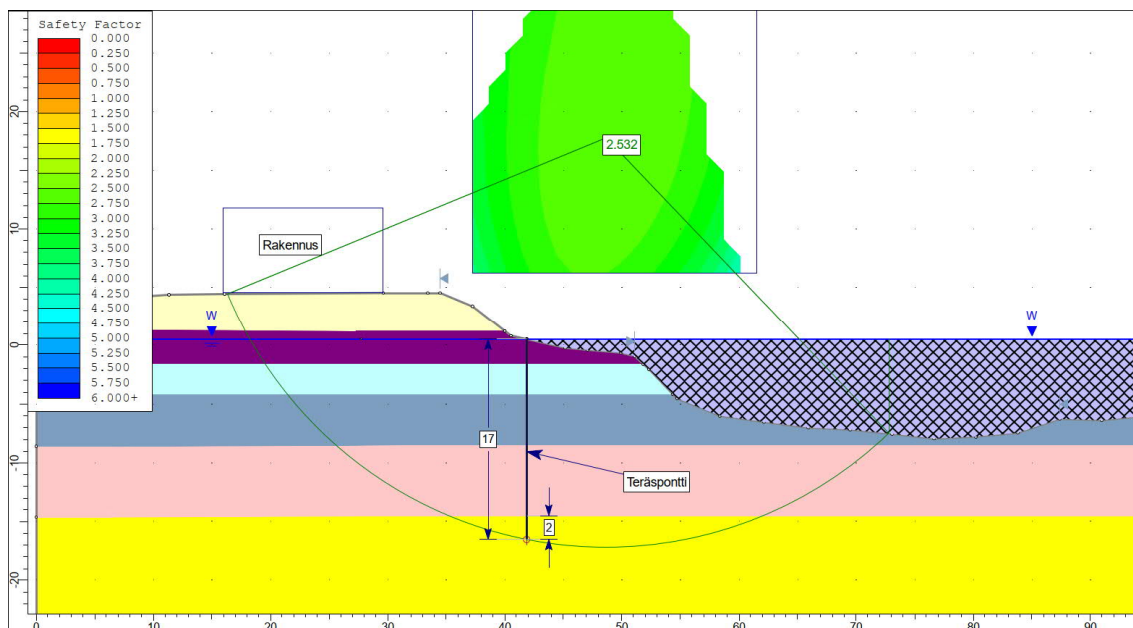
Kuva 38. Stabiiliteetin parantaminen louhepenkereen ja kevennysleikkauksen avulla laskentaleikkauksen 29 380 kohdalla. Louhepenger kuvassa harmaalla.

Laskentaleikkauksen 29 380 kohdalla maanaulat ovat 30 asteen kulmassa vaakatasoon nähden (kuva 39). Naulat ovat 15 metriä pitkä ja niitä on joen törmässä 4 kappaletta yhdessä leikkauksessa. Pituussuunnassa nauloja on metrin välein. Kokonaisvarmuudeltaan pienin liukupinta kiertää maanaulat. Toinen, maanaulat läpäisevä liukupinta kuvaa tilannetta, jossa maanaulat leikkautuisivat ja törmä sortuisi. Maanaulauksen avulla saavutettiin rakennuksilta vaadittavien liukupintojen kokonaisvarmuusvaatimus.



Kuva 39. Stabiiliteetin parantaminen maanaulauksen avulla laskentaleikkauksen 29 380 kohdalla.

Laskentaleikkauksen 29 380 kohdalla tiivis pohjamaa sijaitsee pohjatutkimusten perusteella syvällä, noin tasolla -15. Tämän seurauksena ponttiseinästä tulisi 17 metriä korkea, kun se upotetaan 2 metriä tiiviiseen pohjamaahan (kuva 40). Leikkauksen 29 380 tapauksessa riittävä kokonaisvarmuus (1,8) olisi saavutettu jo 13 metriä pitkillä ponteilla. Tällöin tilanne stabiiliteetin kannalta olisi riittävä, mutta liukupintasortuma voisi viedä teräspontit mukanaan. Ponttiseinää tarkasteltiin laskentaohjelmalla niin, että liukupinta pakotettiin kulkemaan pontin ali. Käytetyssä laskentaohjelmassa ei ollut ponttiseinää kuvaavaa tuenta menetelmää. Tässä työssä teräsponttien riittävää upotussyvyyttä ei tämän tarkemmin tarkasteltu.

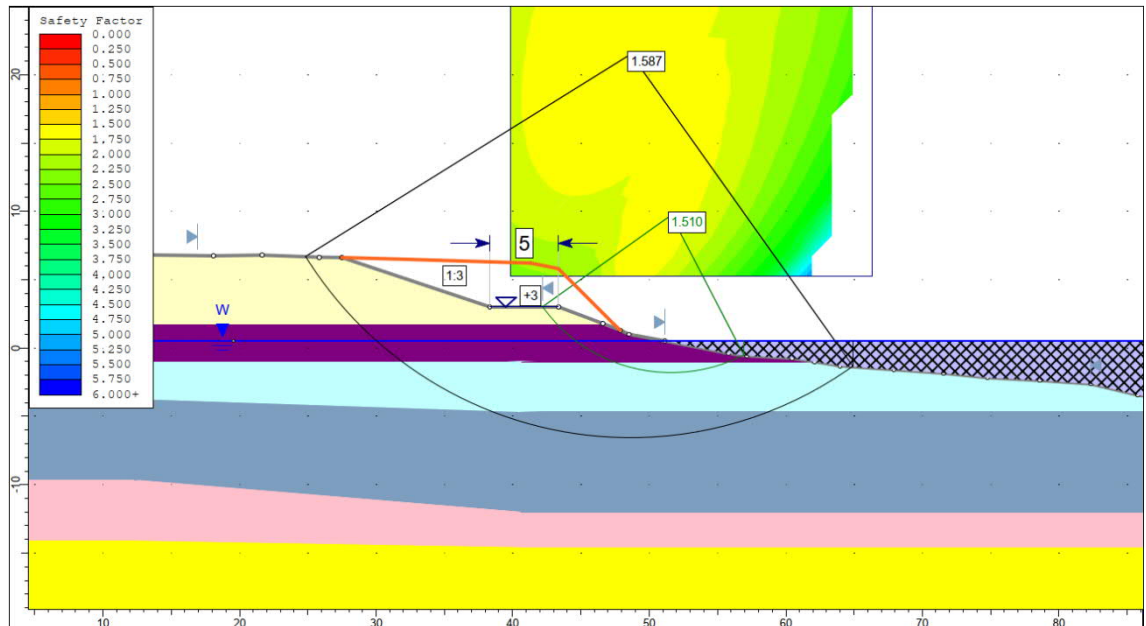


Kuva 40. Stabiliateetin parantaminen ponttiseinän avulla laskentaleikkauksen 29 380 kohdalla.

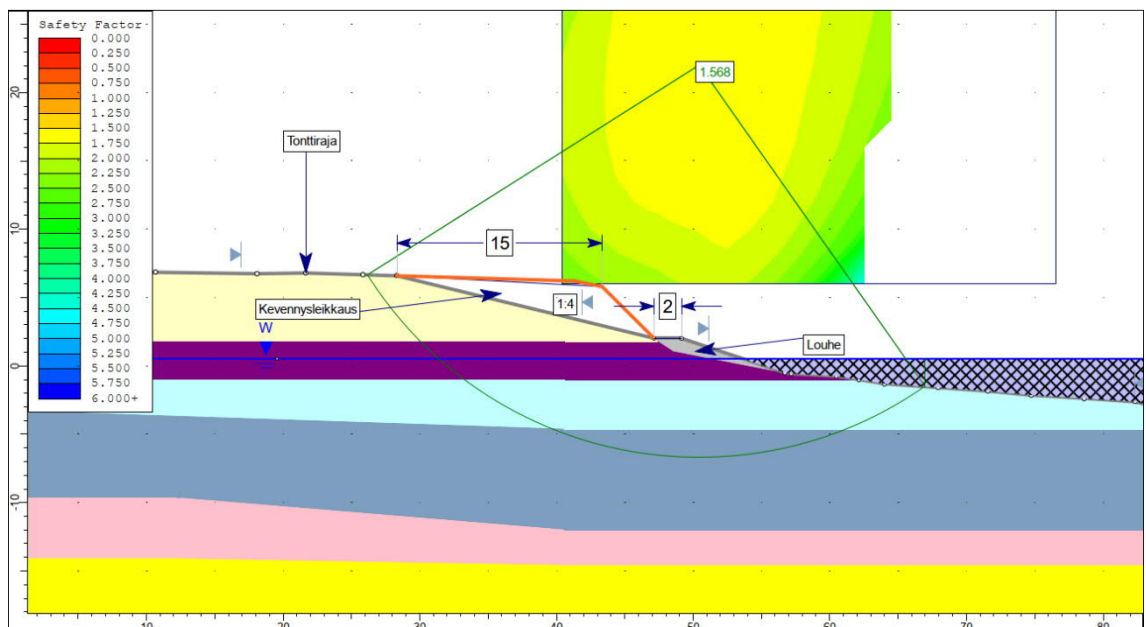
Maanaulauksen ja ponttiseinän avulla saavutettiin rakennuksilta vaadittava kokonaisvarmuus. Rakennusten ulkopuolisilla alueilla stabiliateettia voidaan parantaa esitetyllä tavalla louhepenkereen avulla, tai esimerkiksi harventamalla maanaulausta niin, että saavutetaan kokonaisvarmuus 1,5.

Harmaalinnassa tarkasteltiin kahden erilaisen joen törmään tehtävän kevennysleikkauksen vaikutusta stabiliateettiin. Toisen kevennysleikkauksen tapauksessa joen törmän alareunassa on pieni louheesta tehty tukipenger/eroosiosuojaus. Harmaalinnan alueella on Koivistonluotoon verrattuna enemmän tilaa tehdä joen törmään kevennysleikkauksia, sekä alueella täyttyi kokonaisvarmuusvaatimus rakennuksilta lähteville liukupinnoille yhtä laskentaleikkausta lukuun ottamatta. Näin ollen ei nähty tarvetta tarkastella maanaulauksen tai ponttiseinän tapauksia. Kevennysleikkausten ehtona oli, että kevennyksen avulla saavutetaan kokonaisvarmuus 1,5 kaikilta liukupinnoilta. Kevennysleikkaus A:ssa joen törmään leikattiin 5 metriä leveä tasanne tasolle +3, joka luiskattiin nykyiseen maanpintaan kaltevuudella 1:3 (kuva 41). Kevennysleikkaus B:ssä 2 metriä leveä tukipenger tehtiin tasolle +2, josta kevennysleikkaus kaltevuudella 1:4 nykyiseen maanpintaan (kuva 42). Kevennysleikkauksen A tasanne, sekä kevennysleikkauksen B tukipenkereen taso ovat

molemmat keskimääräisen ylivedenkorkeuden (+1,7) yläpuolella, joten niitä on mahdollista käyttää esimerkiksi kävelypolkuina.



Kuva 41. Kevennysleikkaus A laskentaleikkauksen 31 450 tapauksessa. Kuvassa oranssilla esitetty nykyinen maanpinta.



Kuva 42. Kevennysleikkaus B laskentaleikkauksen 31 450 tapauksessa. Kuvassa oranssilla esitetty nykyinen maanpinta.

Taulukossa 21 on esitetty kevennysleikkausten vaikutukset laskentaleikkauksilta 30 600, 31 100 ja 31 450. Taulukossa on esitetty kokonaisvarmuudet luvussa 6.2 esitettyjä etäisyyksiä vastaavilta kohdilta, eli 2 (F_{2m}) ja 10 (F_{10m}) metrin etäisyyksiltä nykyisestä joen törmän harjasta. Lisäksi taulukossa on nykytilannetta vastaavat kokonaisvarmuudet, sekä leikkauksen määrä neliöinä tarkastellussa poikkileikkauksessa. B-vaihtoehdossa louheen määrä on noin 6 m² leikkausta kohden.

Taulukko 21. Stabiliateetin parantaminen Harmaalinnessa.

Paalulukema	Nykytila		Kevennysleikkaus A			Kevennysleikkaus B		
	F_{2m}	F_{10m}	F_{2m}	F_{10m}	m ²	F_{2m}	F_{10m}	m ²
30 600	1,20	1,57	1,70	1,72	28	1,57	1,57	12
31 100	1,08	1,67	1,62	2,08	31	1,85	1,91	14
31 450	0,90	1,30	1,51	1,59	39	1,57	1,57	29

Taulukosta huomataan, että molemmat kevennysleikkaukset parantavat stabiliateettia tarkastelluissa leikkauksissa merkittävästi. A-vaihtoehdossa leikkaus on suurempi, mitä B-vaihtoehdossa. B-vaihtoehdossa leikkaus ulottuu kuitenkin kauemmas joen törmästä mitä A-vaihtoehdossa. Leikkauksen 31 450 kohdalla tontit ovat lähimpänä jokea ja B-vaihtoehdon leikkaus ulottuu lähelle tonttirajaa (kuva 42). Paalun 30 600 kohdalla 10 metrin etäisyydeltä lähtevä liukupinta ulottuu nykytilanteessa joen syvänneuraan. Kyseisessä kohtaa kevennysleikkaus A parantaa myös joen syvänneuraan ulottuvien liukupintojen kokonaisvarmuuksia, kun taas kevennysleikkauksen B osalta varmuudet pysyvät entisellään. Tämän selittää B-vaihtoehdon pieni leikkausmäärä (12 m²), sekä törmän juuressa sijaitseva louhe (6 m²). Pidempien liukupintojen suhteen louhe kasvattaa leikkausjännitystä. Louheen tilavuuspaino on suurempi, mitä leikattavan maan. Näin ollen leikkauksen ansiosta pienentynyt leikkausjännitys joen syvänneuraan ulottuvilla liukupinnoilla palaa lähelle lähtötilannetta louheen seurauksena. Molemmilla vaihtoehdoilla päästään kokonaisvarmuusvaatimukseen. Parantavien toimenpiteiden tarkastelussa oli mukana leikkaukset, joissa aiemmin laskennassa määritettiin alhaisimmat kokonaisvarmuudet lyhyille (laskentaleikkaus 31 450) ja pitkille (laskentaleikkaus 30 600) liukupinnoille. Näin ollen voidaan perustella, että tarkastelluilla kevennysleikkauksilla saavutetaan vaadittu kokonaisvarmuus koko paaluvälillä 30 600-31 600.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOTOIMENPITEET

Tarkastelun perusteella stabiliteetti on Koivistonluodossa nykytilassa heikko, varsinkin paaluvälillä 29 100-29 800. Avoimen tilan tarkasteluissa nopean vedenpinnan laskun jälkeen kokonaisvarmuudet ovat hieman alle tai yli yhden, joten sortumat alueella ovat mahdollisia. Huolestuttavaa edellä mainitulla paaluvälillä on se, että asuinrakennukset sijaitsevat hyvin lähellä joen törmää. Kokonaisvarmuus ei parane merkittävästi verrattaessa vaarallisinta liukupintaa rakennukselta lähtevään liukupintaan. Lisäksi ei saatu selvitettyä ovatko joen törmän läheisyydessä sijaitsevat rakennukset perustettu paaluille vai maanvaraisesti. Mikäli rakennukset on perustettu maanvaraisesti, niin tilanne on entistä vaarallisempi, sillä sortuman tapahtuessa rakennukselle ulottuvaa liukupintaa pitkin, voi rakennus pahimmassa tapauksessa sortua sortuvan maamassan mukana. Tällöin myös vaara ihmishengelle on suuri. Laskennassa ei otettu huomioon rakennuksista mahdollisesti aiheutuvaa lisäkuormitusta, koska ei saatu varmuutta rakennusten perustamistavasta. Vertailun vuoksi tarkasteltiin kahdesta laskentaleikkauksesta tilannetta, joissa oletettiin rakennuksen olevan perustettu maanvaraisesti. Tällöin rakennuksesta huomioitiin aiheutuvan 15 kPa:n suuruinen tasokuorma. Lisäkuormituksen ei havaittu aiheuttavan muutosta kokonaisvarmuuteen.

Vuosina 2010 ja 2014 suoritettujen luotausten perusteella tilanne stabiliteetin suhteen tulee Koivistonluodossa heikkenemään tulevaisuudessa. Luotausten perusteella eroosio on voimakkainta samalla paaluvälillä, missä myös stabiliteetti on heikoimmillaan. Tarkastelussa alhaisin stabiliteetti määritettiin laskentaleikkauksesta 29 280. Kyseisen leikkauksen kohdalla havaittiin, ettei eroosio ole vuosien 2010 ja 2014 välisellä ajalla heikentänyt stabiliteettia, koska leikkauksen kohdalla eroosio on keskittynyt uoman keskelle. Tämä voi johtua siitä, että paalulukema 29 280 sijoittuu joessa kaarteiden väliin, kun taas esimerkiksi jokipaalun 29 580 kohdalla pengertasanne oli vetäytynyt luotausten välisenä aikana 1,5 metriä. Paalun 29 580 kohdalla pengertasanne sijoittuu joen ulkokaarteeseen, missä eroosio on voimakkainta, kuten luvussa 3 kerrottiin. Luotausten perusteella Koivistonluodon muilla tuloksissa esitetyillä paaluväleillä tilanne ei tulevaisuudessa näyttäisi merkittävästi tai nopeasti muuttuvan mikäli tilanne muuten pysyy ennallaan.

Tarkastelun perusteella joen törmän stabiliteetti on Harmaalinnessa heikko, mutta se ei aiheuta välitöntä vaaraa ihmishengelle tai rakennuksille. Paaluvälillä 30 500-31 600 ovat mahdollisia vuonna 2019 tapahtuneen sortuman kaltaiset tilanteet, joissa joen törmä sortuu lyhyitä liukupintoja pitkin. Paalun 31 450 kohdalla 2 metrin etäisyydeltä lähtevän ympyrän muotoisen liukupinnan kokonaisvarmuudeksi määritettiin avoimen tilan tarkastelussa nopean vedenpinnan laskun jälkeen 0,88. Kyseinen liukupinta vastaa silmämääräisesti arvioituna vuonna 2019 tapahtunutta sortumaa. Sortumasta ei ollut saatavilla ennen ja jälkeen olevaa luotaus- ja laserkeilausaineistoa, niin kuin Ulvilan puoleisesta sortumasta oli. Tämän kaltaisista sortumista ei aiheudu vaaraa rakennuksille, koska joen ja tonttien välissä on riittävän leveä puistoalue. Tämän kaltaiset sortumat voivat kuitenkin aiheuttaa vaaraa ulkona liikkuville ihmisille. Heikoimmillaan stabiliteetti oli paalun 31 450 kohdalla, jossa alhaisin kokonaisvarmuus 10 metrin etäisyydeltä lähtevälle liukupinnalle oli 1,07. Tarkastelun perusteella Ulvilassa tapahtuneen sortuman kaltainen tilanne ei ole mahdollinen Harmaalinnessa.

Samaan tapaan kuin Koivistonluodon, niin myös Harmaalinnan tuloksissa epävarmuutta nykyhetken todelliseen tilanteeseen aiheuttaa tarkastelussa käytettyjen luotausaineistojen ikä. Voimakkaan eroosion alueella (paaluvälillä 30 500-30 800) stabiliteetti on mahdollisesti heikentynyt, etenkin pitkien liukupintojen osalta. Eroosiosta aiheutuvaa stabiliteetin heikkenemistä arvioitiin mallintamalla paalun 30 600 leikkauksessa joen syvänneuraa 1 ja 2 metriä syvemmäksi. Vuosina 2010 ja 2014 suoritettujen luotauksen perusteella on hyvin mahdollista, että vuoden 2014 ja nykyhetken välillä on tapahtunut metrin verran eroosiota paalun 30 600 kohdalla. Luotauksen perusteella muualla Harmaalinnan jokiosuudella edellä mainitun suuruinen eroosio ei ole todennäköistä.

Tarkastelluilla stabiliteettia parantavilla toimenpiteillä pystyttiin saavuttamaan vaaditut kokonaisvarmuudet, sekä Koivistonluodossa, että Harmaalinnessa. Varsinaisten korjaussuunnitelmien laatiminen vaatii kuitenkin lisätutkimuksia ja tarkempaa suunnittelua, etenkin maanaulauksen ja ponttiseinän tapauksissa. Työssä tehdyt tarkastelut maanaulauksen ja ponttiseinän suhteen olivat suoraviivaisia ja yksinkertaistettuja.

Ennen varsinaisten korjaussuunnitelmien laatimista ongelmallisimmille alueille tulisi suorittaa vastaava joen pohjan luotaus, mitä vuosina 2010 ja 2014. Tämän avulla nähtäisiin, kuinka eroosio on kehittynyt ja voitaisiin määrittää nykyhetken todellinen

tilanne stabiliteetin suhteen. Nyt lasketut tulokset pohjautuvat vuosina 2010 ja 2014 suoritettujen luotausten tuloksiin, mikä aiheuttaa epävarmuutta.

Rakennusten perustamistavat tulisi selvittää etenkin Koivistonluodosta paaluväliltä 29 100-29 800. Työtä tehdessä ei saatu varmuutta siitä, kuinka joen rannalla sijaitsevat talot on perustettu. Mahdollisen sortuman tapahtuessa vaara talon vaurioitumiselle ja ihmishengelle on suurempi, mikäli joen rannalla sijaitsevat talot on perustettu maanvaraisesti.

Stabiliteetin kannalta kriittisimmällä alueella, eli Koivistonluodossa paaluvälillä 29 100-29 800 olisi syytä aloittaa inklinometreillä suoritettavat siirtymämittaukset. Inklinometrien avulla pystyttäisiin reagoimaan maassa mahdollisesti tapahtuviin siirtymiin ennen varsinaista sortumaa.

Tässä työssä tehty tarkastelu on yleistasoinen. Työ ei ota kantaa tonttikohtaisiin tilanteisiin. Tonttikohtaiset tilanteet on tarkasteltava erikseen.

LÄHDELUETTELO

Abramson L.W., Lee T.S., Sharma S. & Boyce G.M. 2001. Slope Stability and Stabilization Methods. Second edition. New York: John Wiley & Sons Inc., 736 s. ISBN 978-0-471-38493-9.

Chakraborty A. & Goswami D. 2016. State of the art: Three Dimensional (3D) Slope-Stability Analysis. International Journal of Geotechnical Engineering, 10(5), S. 493-498.

Charlton R. 2008. Fundamentals of fluvial geomorphology. London: Routledge, 234 s. ISBN 0-203-37108-9.

Chaudhary K. B., Domingos V. H., Gitirana Jr. G., Fredlund M. & Lu H. 2016. Three-Dimensional Slope Stability: Geometry Effects. Tailings and Mine Waste Conference, Vol. 16.

Cheng Y.M. & Yip C.J. 2007. Three-Dimensional Asymmetrical Slope Stability Analysis Extension of Bishop's, Janbu's and Morgenstern-Price's Techniques. Journal of Geotechnical Engineering, 133 (12), S. 1544-1555.

Coppin N. J. & Richards I. G. 1990. Use of Vegetation in Civil Engineering. Construction Industry Research and Information Association, 292 s. ISBN 0-86017-711-4.

Craig R.F. 2004. Craig's Soil Mechanics. Seventh edition. London and New York: Spon Press, 458 s. ISBN 0-415-32702-4.

Duncan J. M., Wright S. G. & Brandon T. L. 2014. Soil Strength and Slope Stability. Second Edition. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 317 s. ISBN 978-1-118-65165-0.

Fredlund M. D., Fredlund D. G. & Zhang L. 2010. Moving from 2D to a 3D unsaturated slope stability analysis. PanAm Unsaturated Soils 2017, S. 136-145.

Gens A., Hutchinson J. & Cavounidis S. 1988. Three-dimensional analysis of slides in cohesive soils. Géotechnique, 38 (1), S.1-23.

GEO-SLOPE International, 2014. Stability Modeling with SLOPE/W. An Engineering Methodology [verkkodokumentti]. September 2014 Edition. Calgary. Saatavissa: <http://downloads.geo-slope.com/geostudioresources/books/8/14/slope%20modeling.pdf> [Viitattu 27.01.2021]. 240 s.

Helenelund K. V. 1967. Maarakennusmekaniikka 137. Espoo: Otakustantamo, 278 s. ISBN 951-671-060-3.

Hovland H. 1977. Three-dimensional slope stability analysis method. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 103 (9), S.971-986.

Huang C. C., Tsai C. C. & Chen Y. H. 2002. Generalized method for three dimensional slope stability analysis, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 128 (10), S. 836–848.

Huang Y. H. 1983. Stability Analysis of earth slopes. New York: Van Nostrand Reinhold Company Inc., 305 s. ISBN 978-1-4684-6602-7.

Jaffari S. H. & Karimi H. 2014. Comparison in Limit Equilibrium Methods of Slices in Slope Stability Analysis. Journal of Applied Science and Agriculture, 9, S. 1440-1451.

Johnson A.W. & Stypula J.M. 1993. Guidelines for Bank Stabilization Projects in Riverine Environments of King County, King County Department of Public Works, Surface Water Management Division, Seattle, Washington.

Kalatehjari R. & Ali N. 2013. A review of three-dimensional slope stability analyses based on limit equilibrium method. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 18, S. 119-134.

Ketonen R. 2010. Porin tulvasuojeluhankkeen vakavuustarkastelu. Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikka, 195 s.

Kinnunen J.-P. & Lindfors I. 2000. Karjarannan pohjavesialueen riskikartoituksen loppuraportti, Osa 1. Porin Vesi, 57 s.

Knighton D. 1998. Fluvial Forms & Processes: A New perspective. Lontoo. Hodder Arnold, 383 s. ISBN 0-340-66313-8.

Koskinen M. 2006. Porin tulvat – Hallittuja riskejä? Lounais-Suomen ympäristökeskus. Turku, 82 s.

Laakso A. 2014. Ulvilan jokisortuman syy selvisi – alueelle ei käyttökieltoa. Yle Uutiset.

Lehtonen V. & Mansikkamäki J. 2018. Penkereiden stabiliteetin laskentaohje. Liikenneviraston ohjeita 14/2018, Liikennevirasto, 39 s. ISBN 978-952-317-629-4.

Niinikoski J. 2011. Kokemäenjoen deltan maaperämuodostumat ja niiden vaikutus Porin tulvasuojeluun. Pro gradu –tutkielma, Turun Yliopisto, Maantieteen ja Geologian laitos, 131 s.

Ollila M. 2002. Ylimmät vedenkorkeudet ja sortumariskit ranta-alueille rakennettaessa: Suositus alimmista rakentamiskorkeuksista. Ympäristöopas, 52. Suomen ympäristökeskus, Ympäristöministeriö, Maa- ja metsätalousministeriö, Helsinki, 54 s. ISBN 952-11-1263-8.

Osman A. M., & Thorne C. R. 1988. Riverbank stability analysis. I: Theory. Journal of Hydraulic Engineering, 114(2), S. 134–150.

Porin kaupunki, 2019. Porin kaupungin rakennusjärjestys. Porin kaupunki. 20 s.

Porin kaupunki, 2021. Tulvasuojelu [verkkodokumentti]. Porin kaupunki: Tulvasuojelu. Saatavissa: <https://www.pori.fi/tulvasuojelu> [viitattu 15.2.2021].

Pirkanmaan ELY-keskus. 2020. Kokemäenjoen säännöstely. [verkkodokumentti]. Saatavissa: https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Vesi/Vesien_kaytto/Saannostely/Saannostellyt_jarvet_ja_joet/Kokemaenjoen_saannostely [viitattu 15.12.2020].

Rajala J. 2013. Kokemäenjoen tulvasuojelun historia. Porin kaupunki, Porin tulvasuojeluhankkeen tutkimuksia, 74 s.

Rantamäki M., Jääskeläinen R. & Tammirinne M. 1997. Geotekniikka. Espoo: Otatieto, 293 s. ISBN 978-951-672-257-6.

Ratahallintokeskus. 2005. Radan stabiliteetin laskenta, olemassa olevat penkereet. Ratahallintokeskuksen julkaisuja B15. Helsinki, 27 s. ISBN 952-445-119-0.

Roberts J., Jepsen R., Gotthard D. & Lick W. 1998. Effects of particle size and bulk density on erosion of quartz particles. Vol. 124: Journal of hydraulic engineering, 12, S. 1261-1267.

Rocscience, 2017. Slide3 – 3D Limit Equilibrium Slope Stability Overview. [verkkodokumentti]. Saatavissa: https://www.rocscience.com/help/slide3/pdf_files/theory/3D_Limit_Equilibrium_Slope_Stability.pdf [Viitattu 27.1.2021]. 9 s.

Seuna P. & Vehviläinen B. 1986. Eroosio ja kiintoaineen kulkeutuminen. Teoksessa: Mustonen S. (toim.) Sovellettu hydrologia. Helsinki: Vesi yhdistys r.y., S. 226-255. ISBN 951-95555-1-X.

Slunga E. 1990. Luku 14 Maa- ja kallioliuskien vakavuus. Teoksessa: Mäkelä H. (toim.) RIL157-2 Geomekaniikka II. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, S. 358- 377. ISBN 951-758-213-7.

Stark T. D. & Ruffing D. G. 2017. Selecting Minimum Factors of Safety for 3D Slope Stability Analyses. Geo-Risk 2017, S. 259-266.

Suomen ympäristökeskus (SYKE), 2021. Vesistöennusteet, Kokemäenjoen alue [verkkodokumentti]. Saatavissa: <http://www.wi2.ymparisto.fi/i2/35/q35vanhay/wqfi.html> [viitattu 25.2.2021].

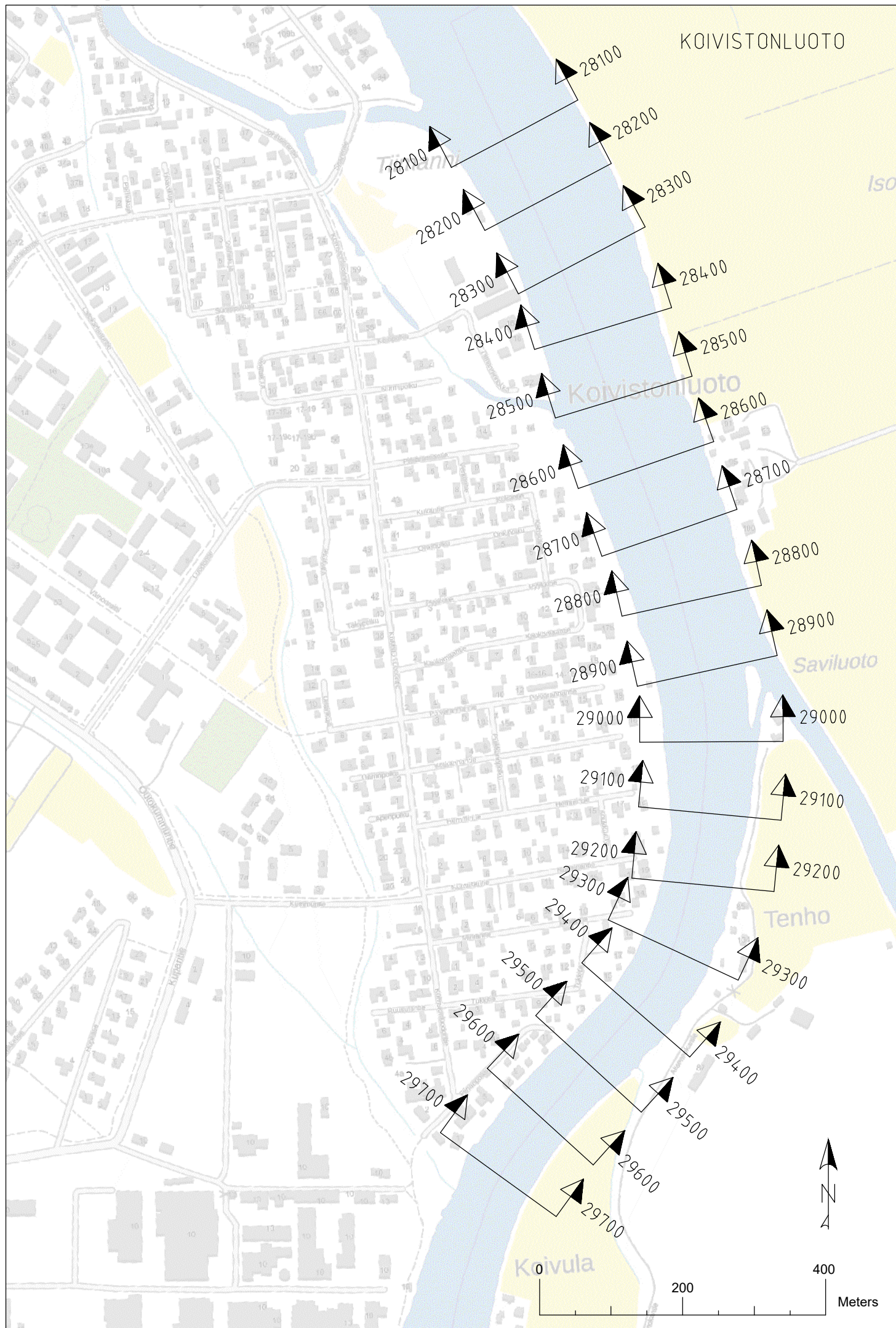
Tervala T. 2016. Sedimentaatio ja eroosio Kokemäenjoen Porin osuudella. Diplomityö, Oulun Yliopisto, Ympäristötekniikka, 108 s.

Thorne C. R. & Tovey N. K. 1981. Stability of composite river banks. Earth Surface Processes and Landforms, 6, S. 469-484.

Turunen J., Marttila H., Kämäri M., Saari M., Heikkinen K., Postila H. & Koljonen S. 2019. Kiintoaineen eroosio ja sedimentaatio virtavesissä - luonnollisesta prosessista virtavesien ongelmaksi. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 46/2019. Suomen ympäristökeskus, 71 s. ISBN 978-952-11-5096-8.

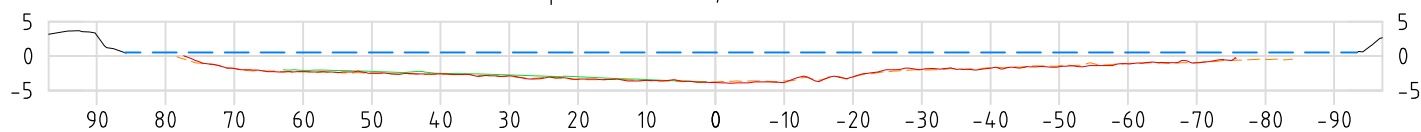
Vehviläinen B. 1981. Joen kiintoainekulkeuman määrittämisestä. Helsinki: Vesihallitus, Tiedotus 216, 58 s. ISBN 951-46-6076-5.

Zhang L., Fredlund M. D., Fredlund D. G. & Haihua L. 2014. Comparison of 2-D and 3-D slope stability analyses for unsaturated soil slopes. Geo Regina.

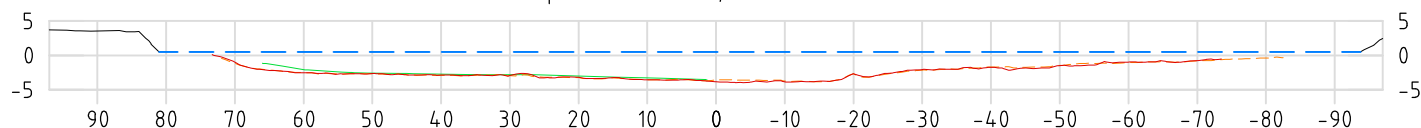


- Veden pinta (MW +0,5)
- - - Luotaus 2010
- Luotaus 2014
- Luotaus 2021

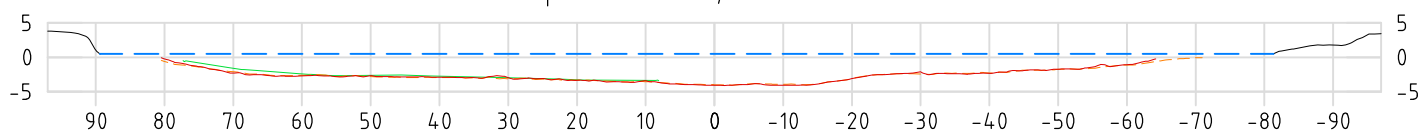
Jokipaalu 28100, Koivistonluoto



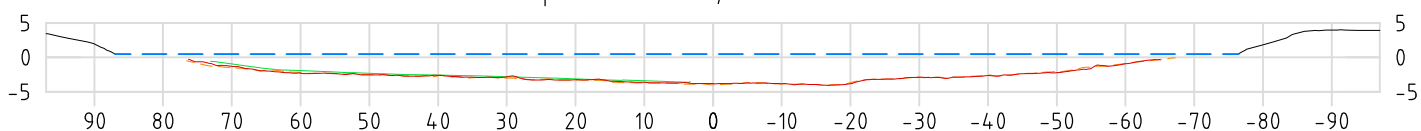
Jokipaalu 28200, Koivistonluoto



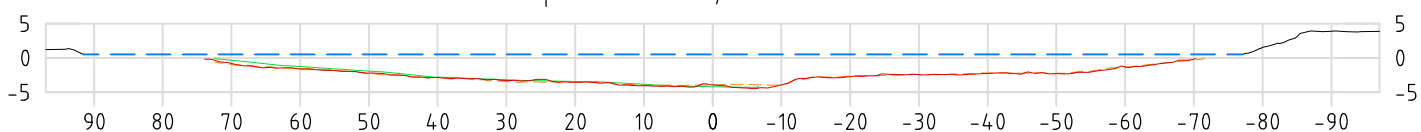
Jokipaalu 28300, Koivistonluoto



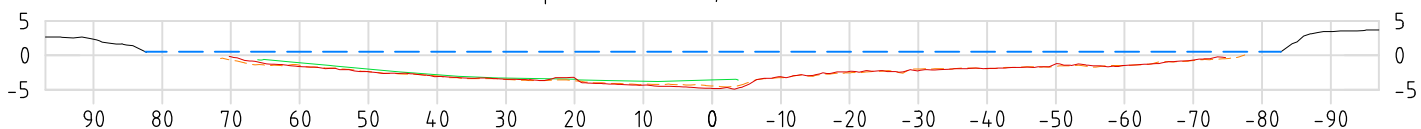
Jokipaalu 28400, Koivistonluoto



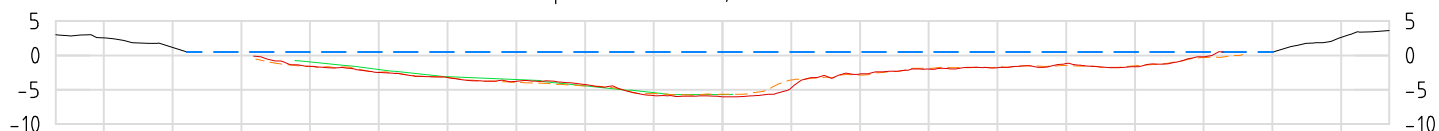
Jokipaalu 28500, Koivistonluoto



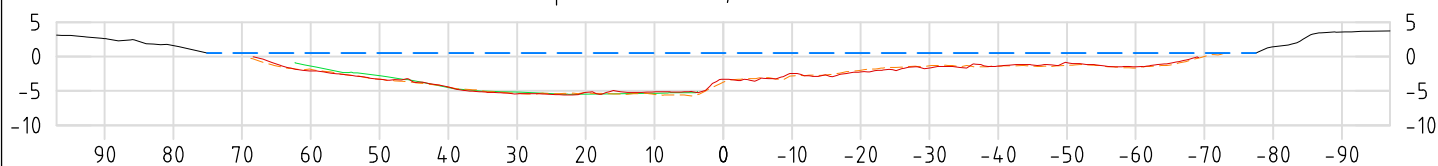
Jokipaalu 28600, Koivistonluoto



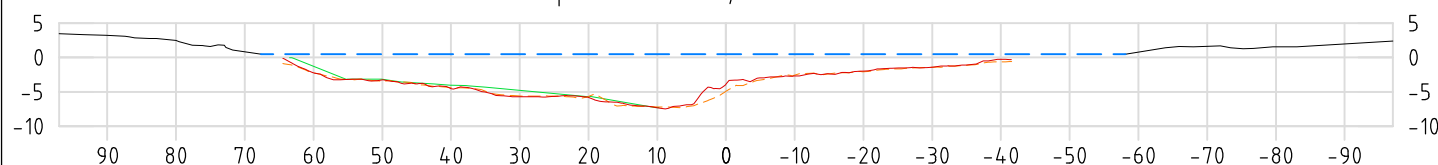
Jokipaalu 28700, Koivistonluoto



Jokipaalu 28800, Koivistonluoto

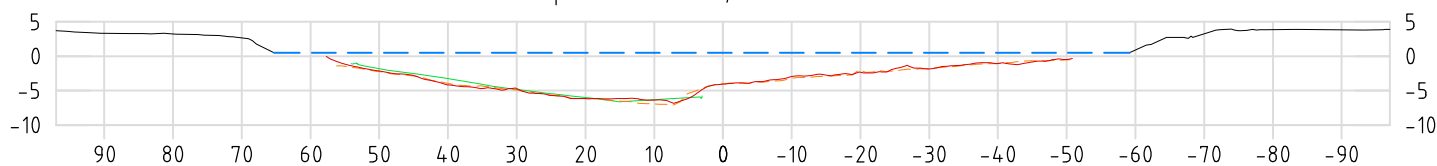


Jokipaalu 28900, Koivistonluoto

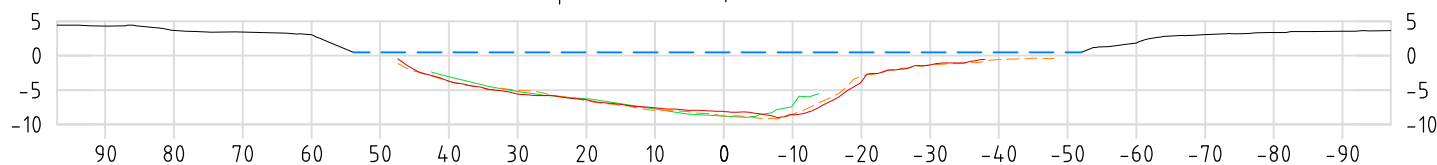


- Veden pinta (MW +0,5)
- - - Luotaus 2010
- Luotaus 2014
- Luotaus 2021

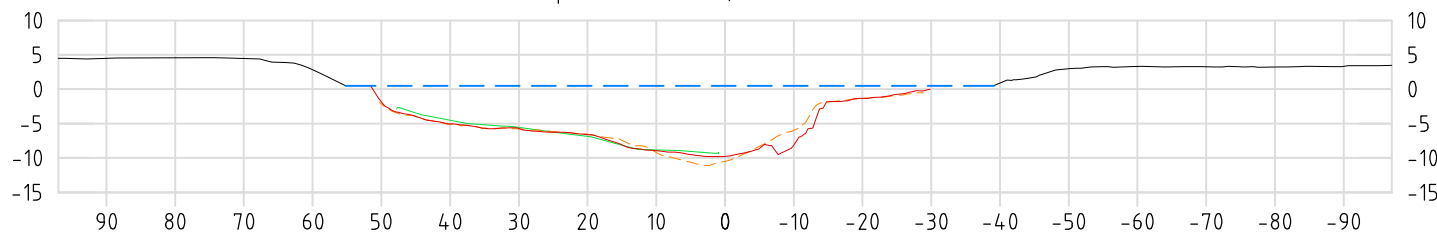
Jokipaalu 29000, Koivistonluoto



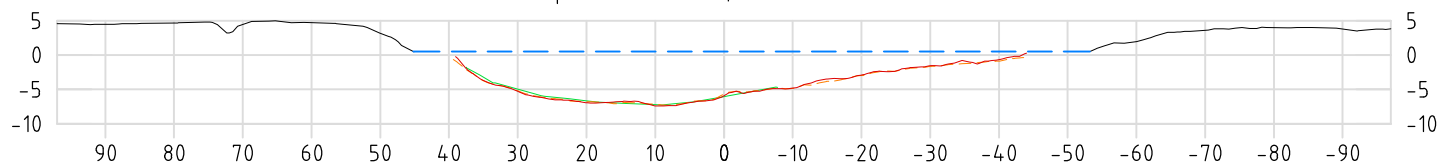
Jokipaalu 29100, Koivistonluoto



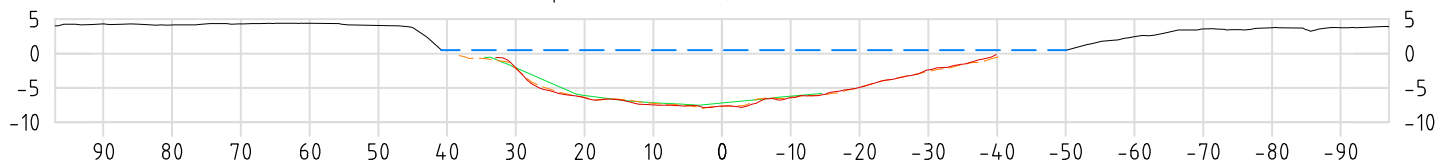
Jokipaalu 29200, Koivistonluoto



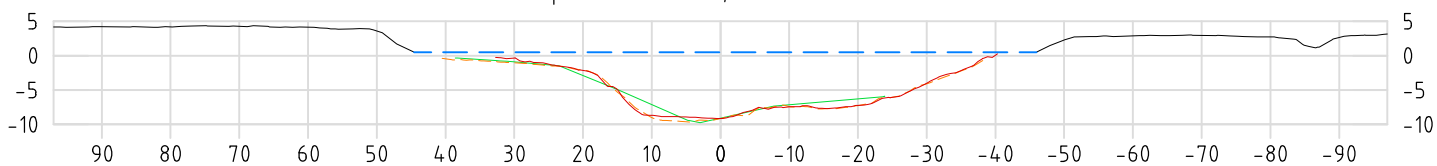
Jokipaalu 29300, Koivistonluoto



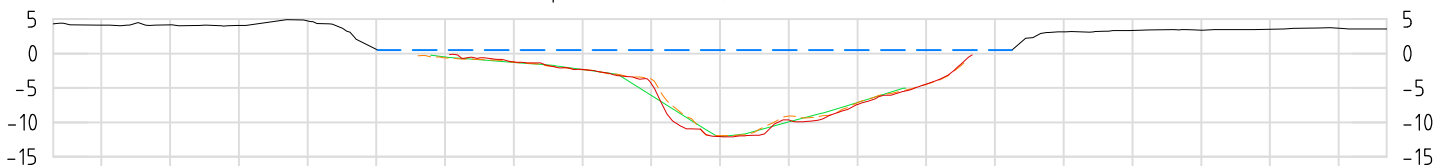
Jokipaalu 29400, Koivistonluoto



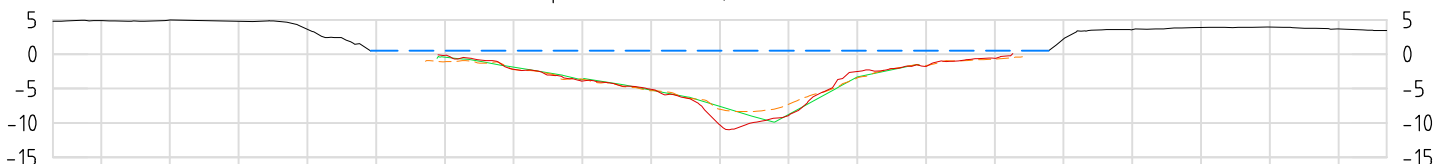
Jokipaalu 29500, Koivistonluoto



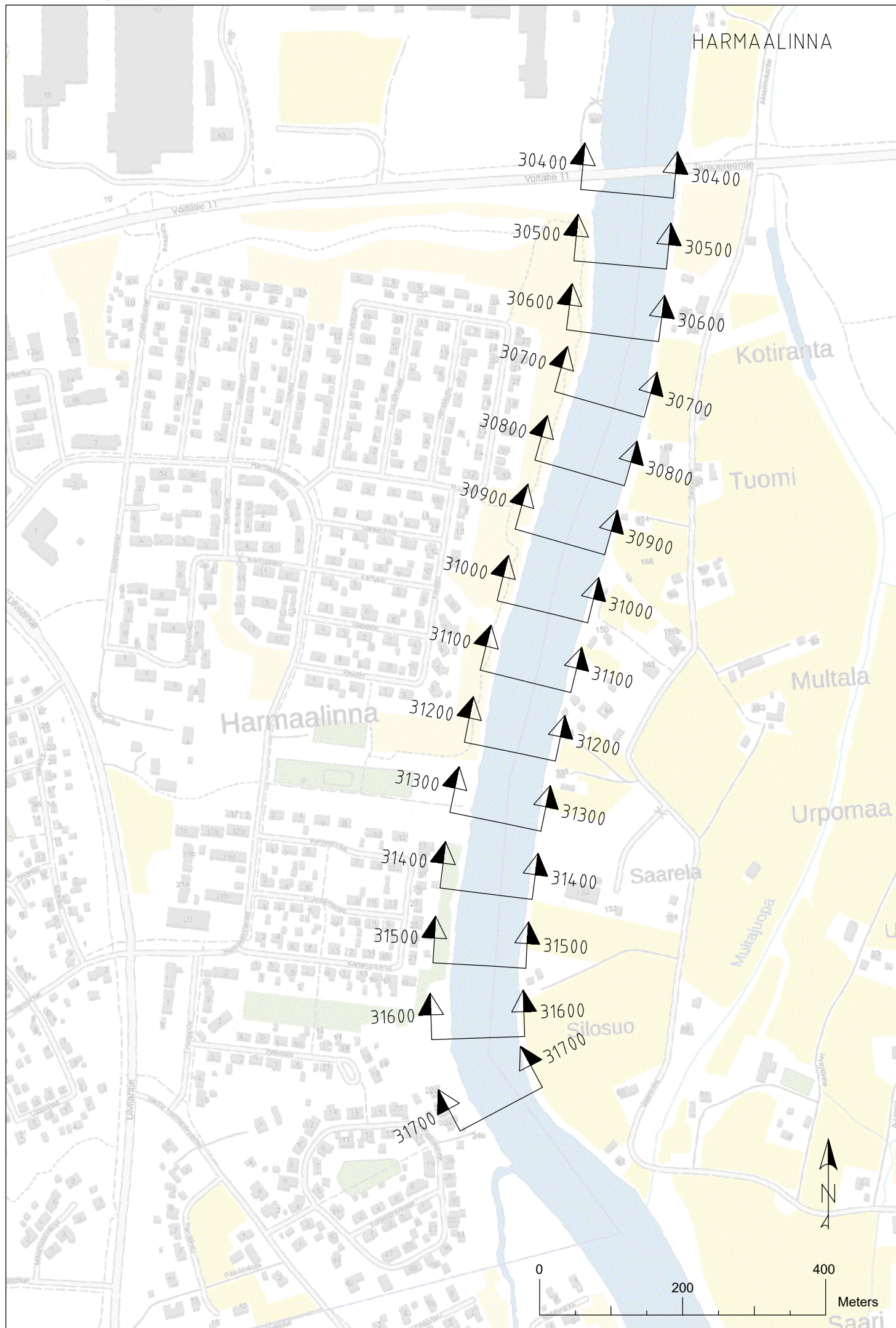
Jokipaalu 29600, Koivistonluoto



Jokipaalu 29700, Koivistonluoto

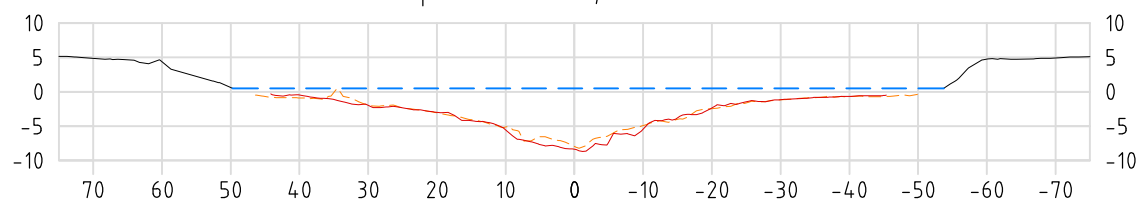


Liite 1 (4). Uoman poikkileikkaukset

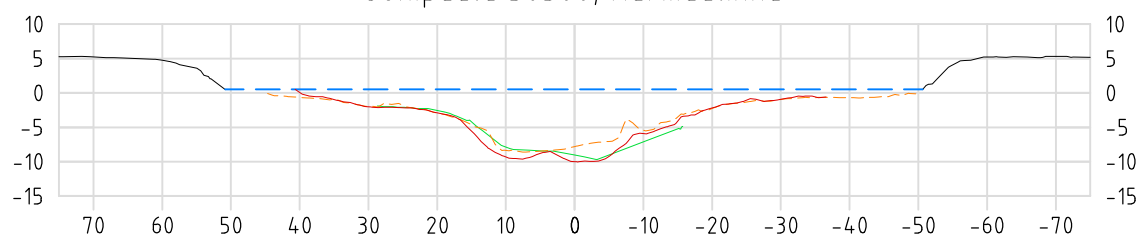


- Veden pinta (MW +0,5)
- - - Luotaus 2010
- Luotaus 2014
- Luotaus 2021

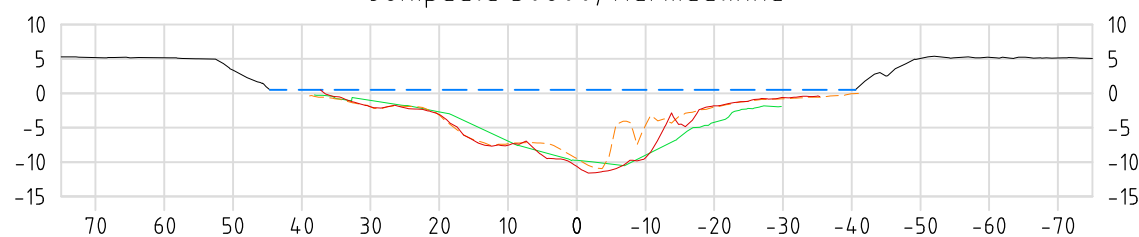
Jokipaalu 30400, Harmaalinna



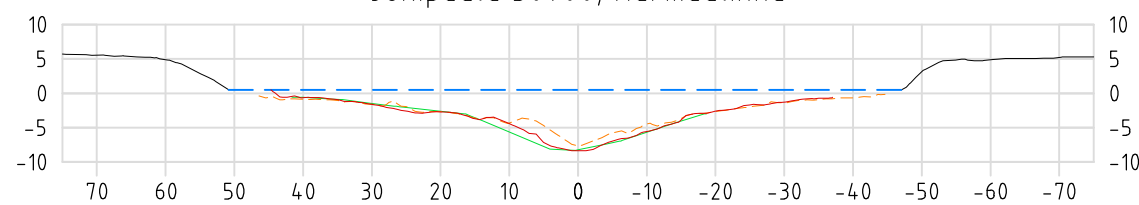
Jokipaalu 30500, Harmaalinna



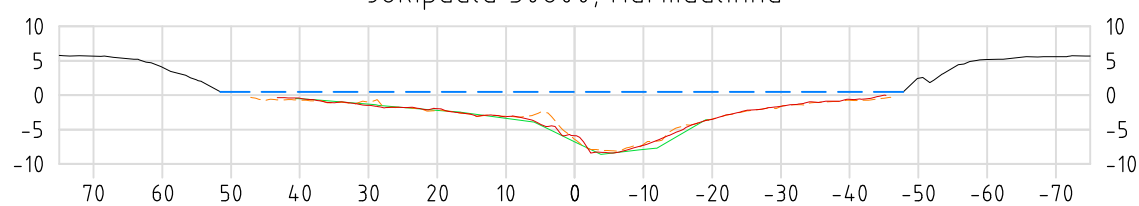
Jokipaalu 30600, Harmaalinna



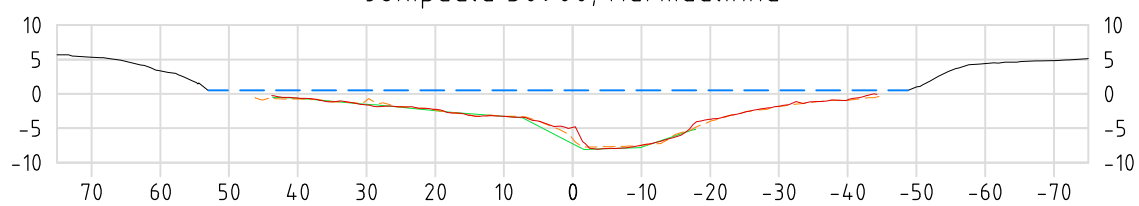
Jokipaalu 30700, Harmaalinna



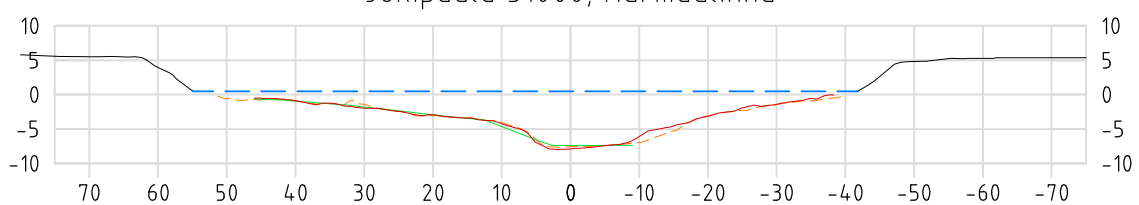
Jokipaalu 30800, Harmaalinna



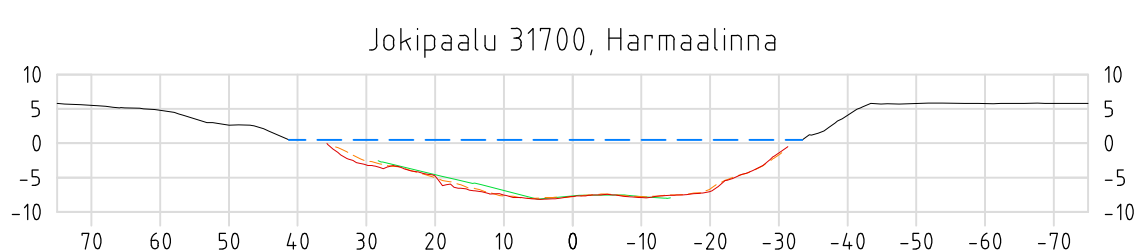
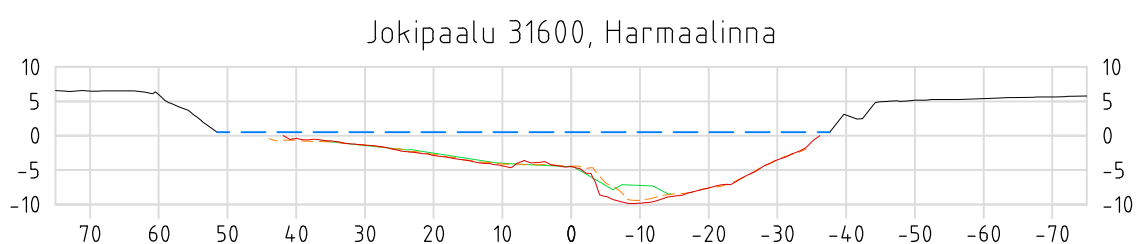
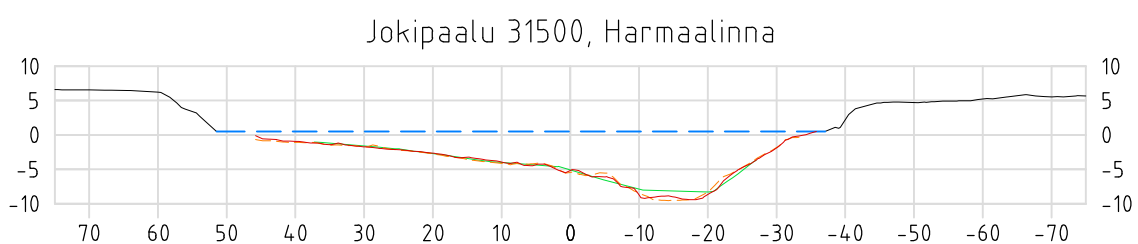
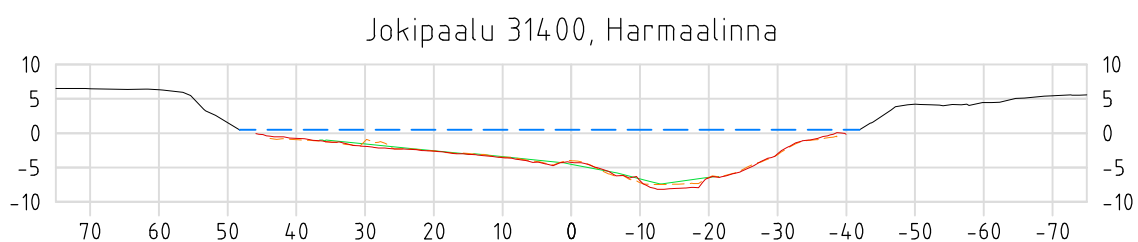
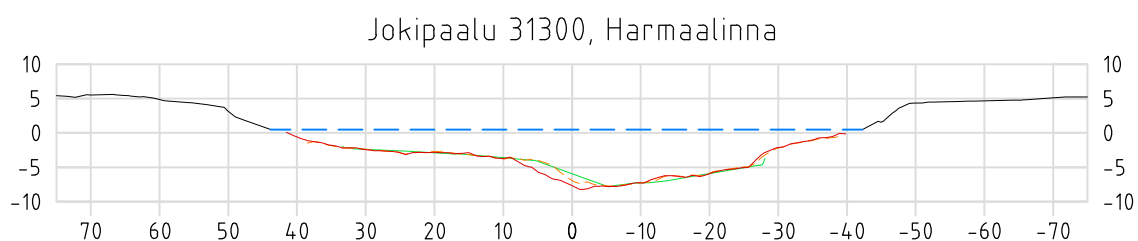
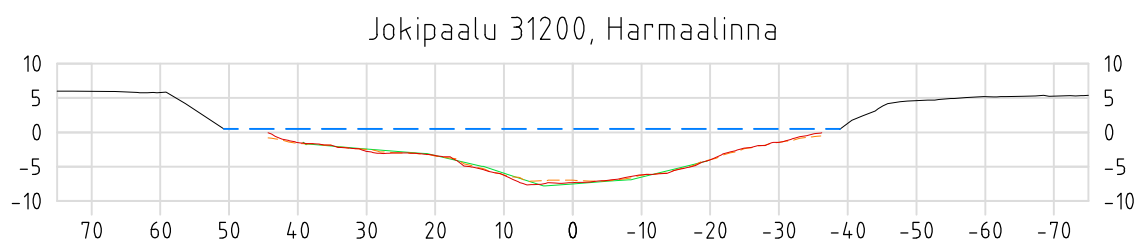
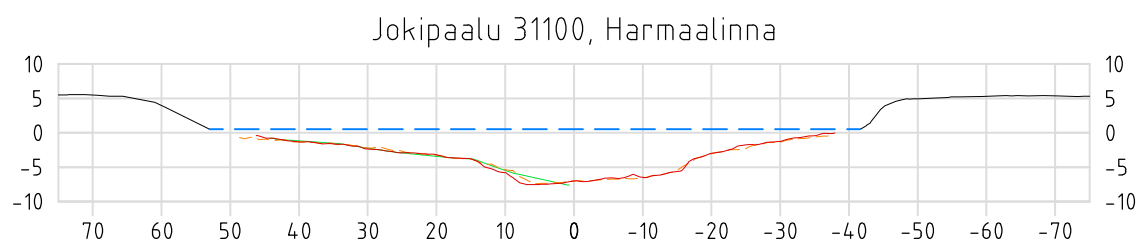
Jokipaalu 30900, Harmaalinna



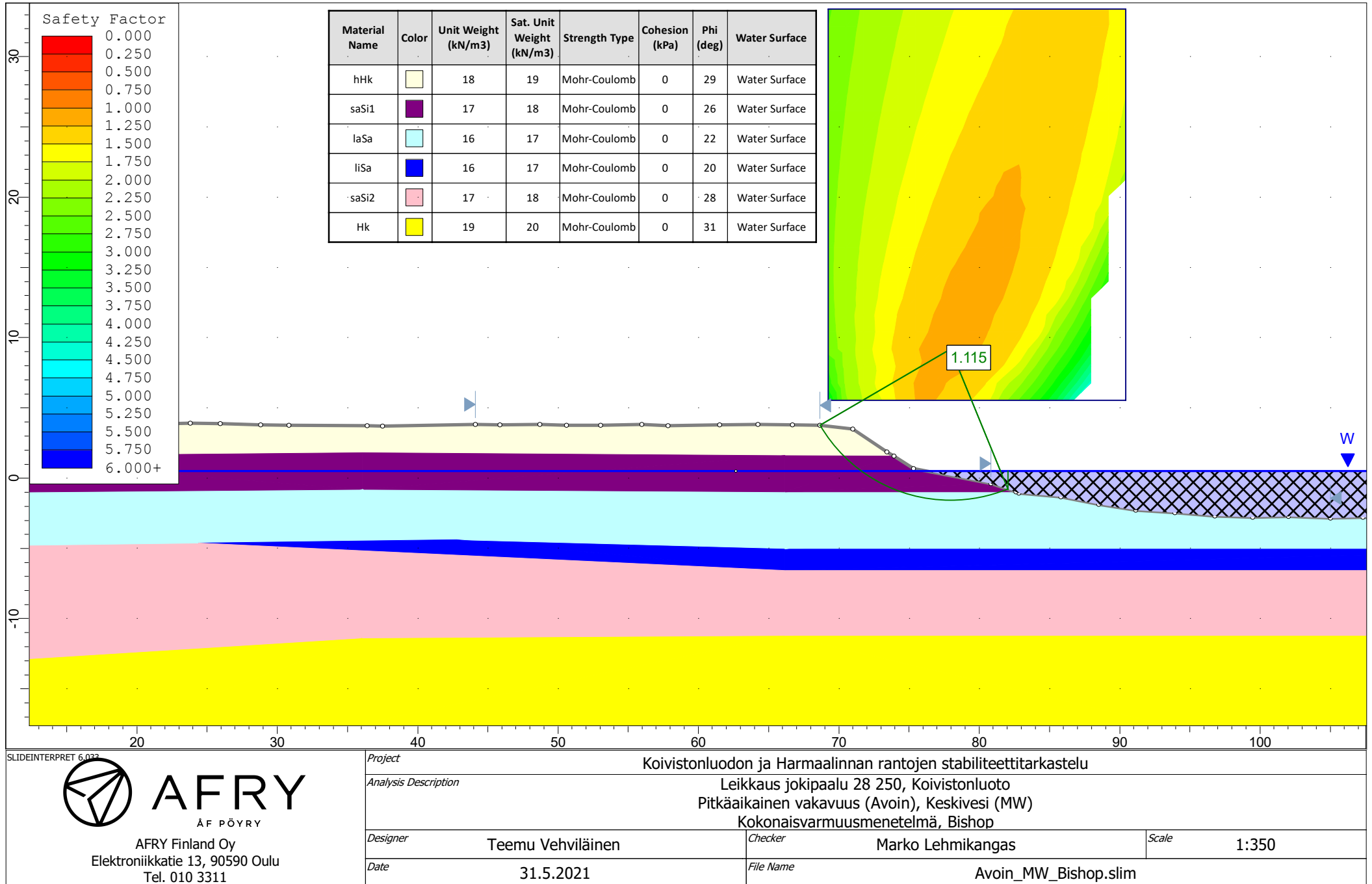
Jokipaalu 31000, Harmaalinna



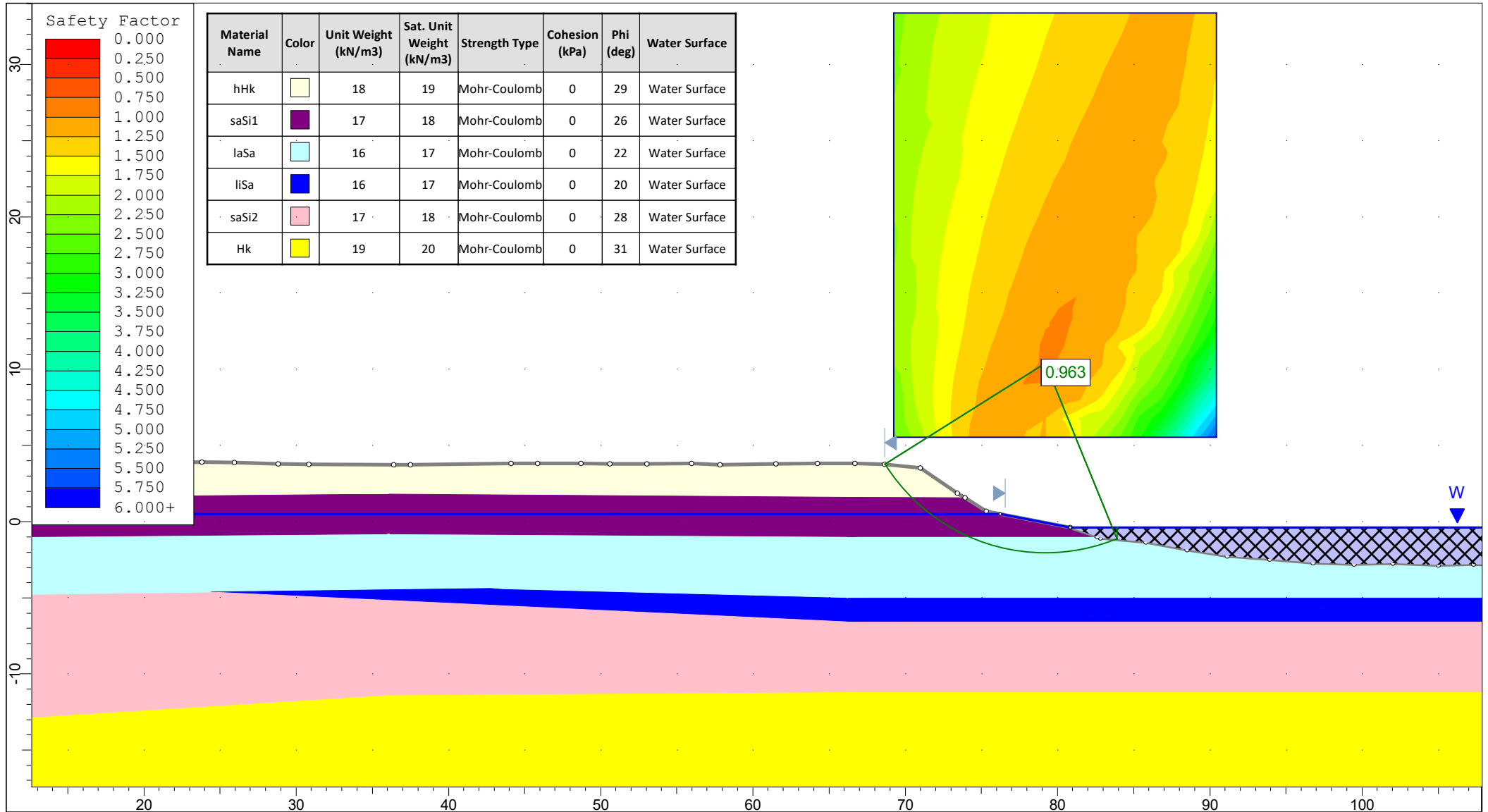
- Veden pinta (MW +0,5)
- - - Luotaus 2010
- Luotaus 2014
- Luotaus 2021



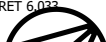
Liite 2 (1). Koivistonluodon laskentatulosteet



Liite 2 (2). Koivistonluodon laskentatulosteet



SLIDEINTERPRET 6.022

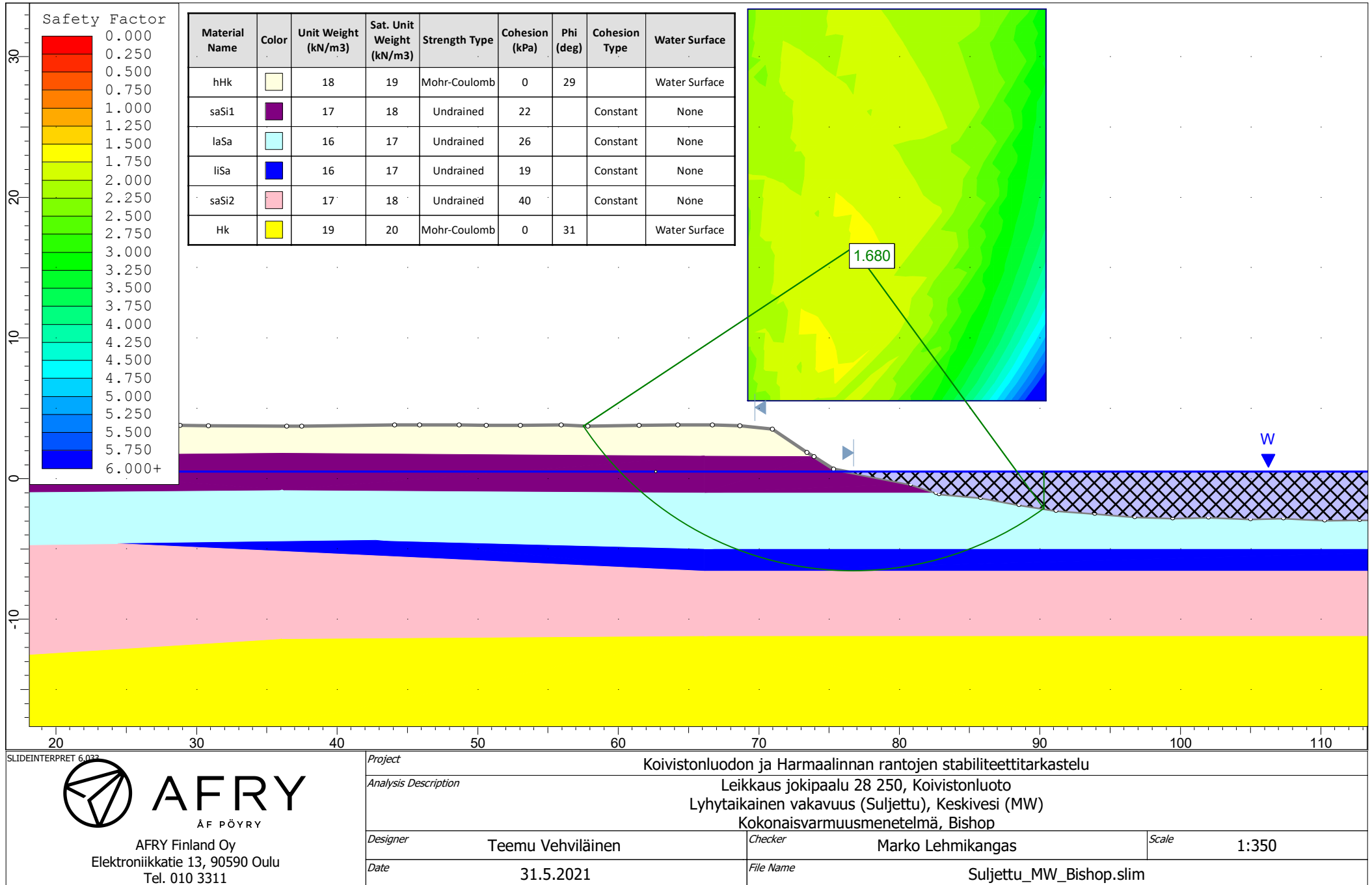


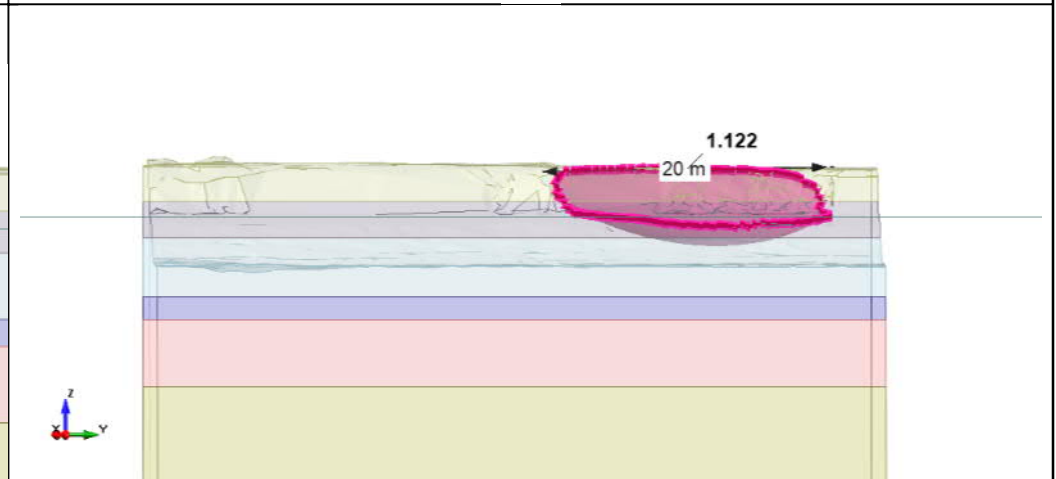
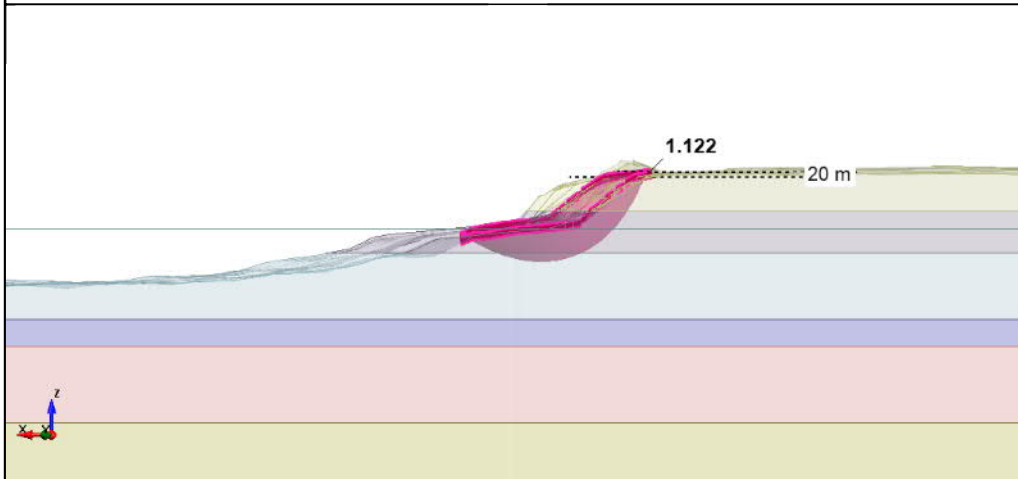
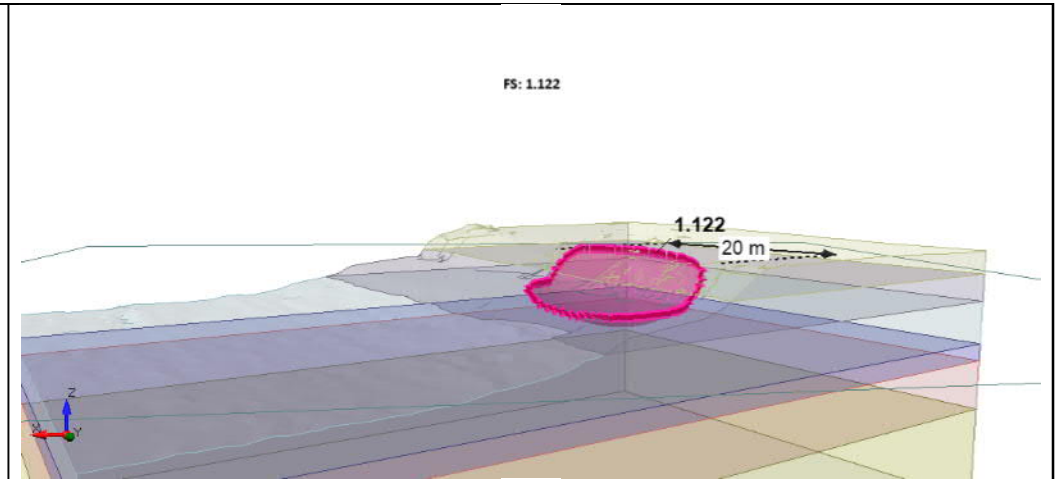
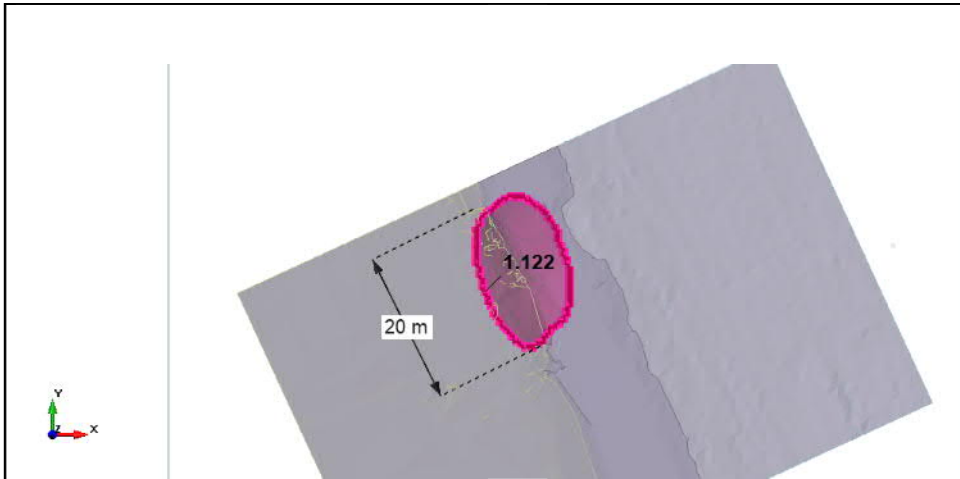
AFRY
AF PÖYRY

AFRY Finland Oy
Elektroniikkatie 13, 90590 Oulu
Tel. 010 3311

Project		Koivistonluodon ja Harmaalinnan rantojen stabiileittitarkastelu	
Analysis Description		Leikkaus jokipaalu 28 250, Koivistonluoto Pitkäaikainen vakavuus (Avoin), Nopea vedenpinnan lasku (MW-NW) Kokonaisvarmuusmenetelmä, Bishop	
Designer	Teemu Vehviläinen	Checker	Marko Lehmikangas
Date	31.5.2021	File Name	Avoin_MW-NW_Bishop.slim
		Scale	1:350

Liite 2 (3). Koivistonluodon laskentatulosteet





Project

Koivistonluodon ja Harmaalinnan rantojen stabiileettitarkastelu

Author

Teemu Vehviläinen

Company

AFRY Finland Oy

Date

June 15 2021, 10:40 AM

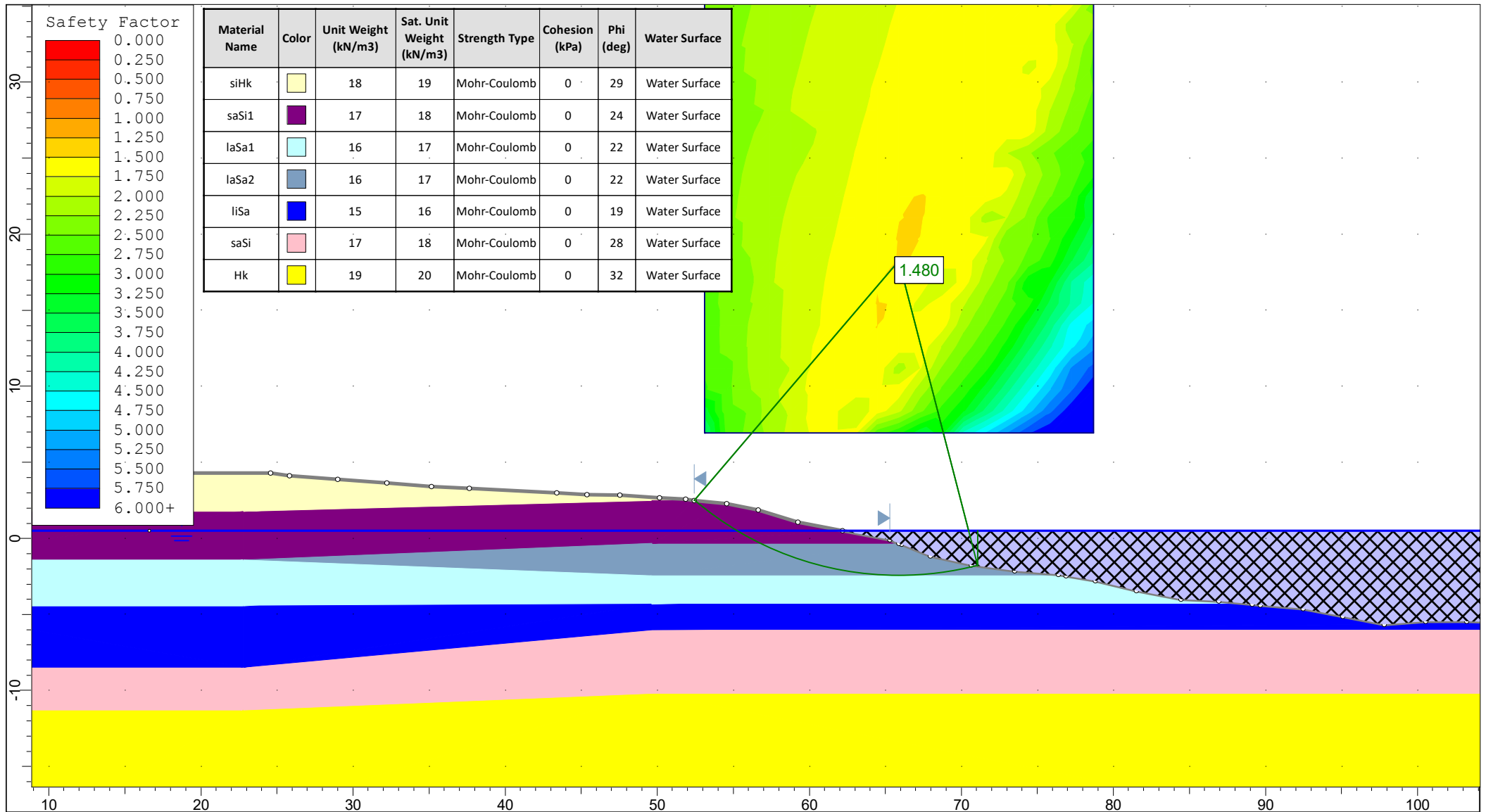
File Name


28250_Koivistonluoto.slide3m2

Analysis

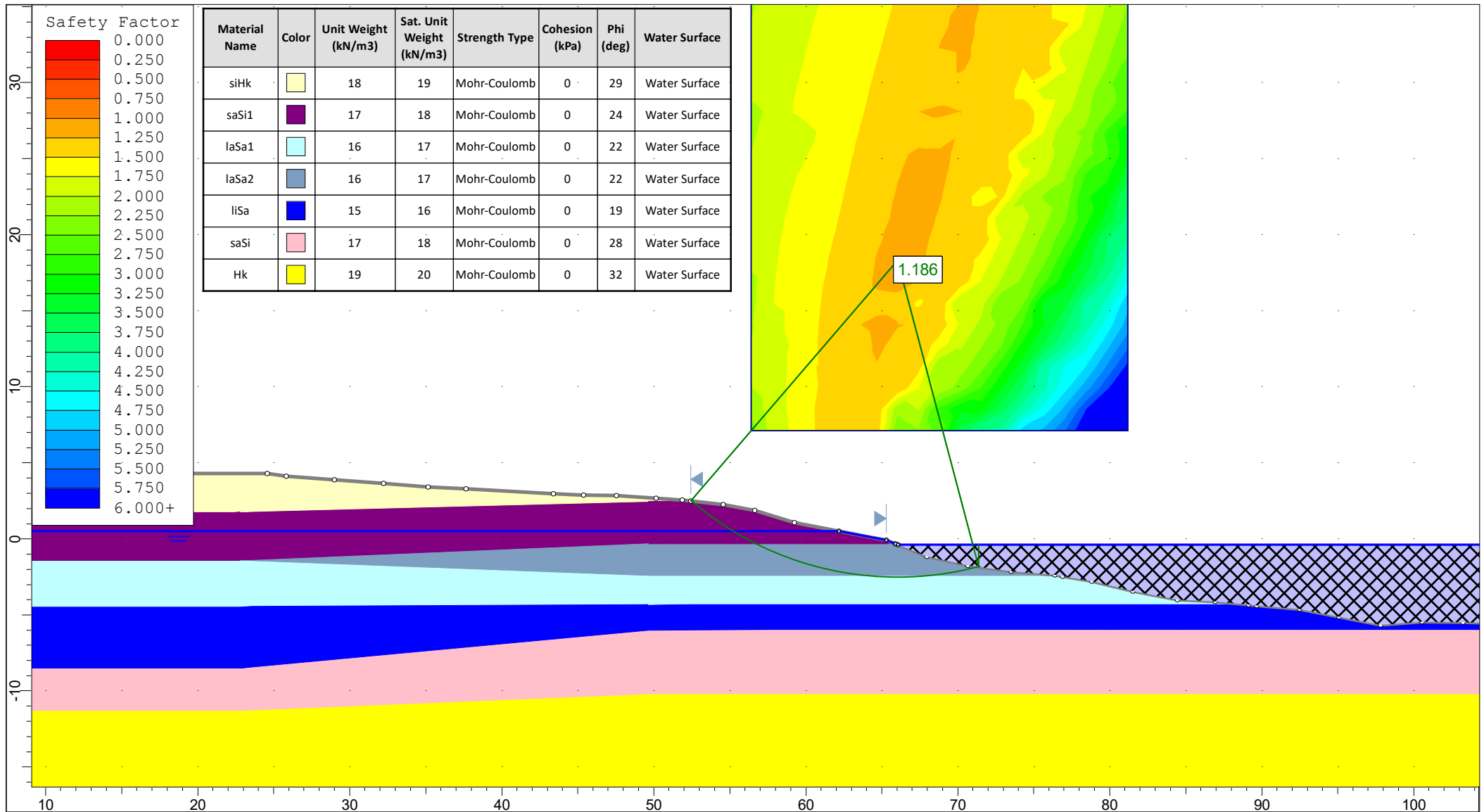
Jokipaalu 28 250, Koivistonluoto, Pitkäaikainen vakavuus (Avoin), Keskivesi (MW), Kokonaisvarmuusmenetelmä, Ellipsoidi liukupinta


Liite 2 (5). Koivistonluodon laskentatulosteet



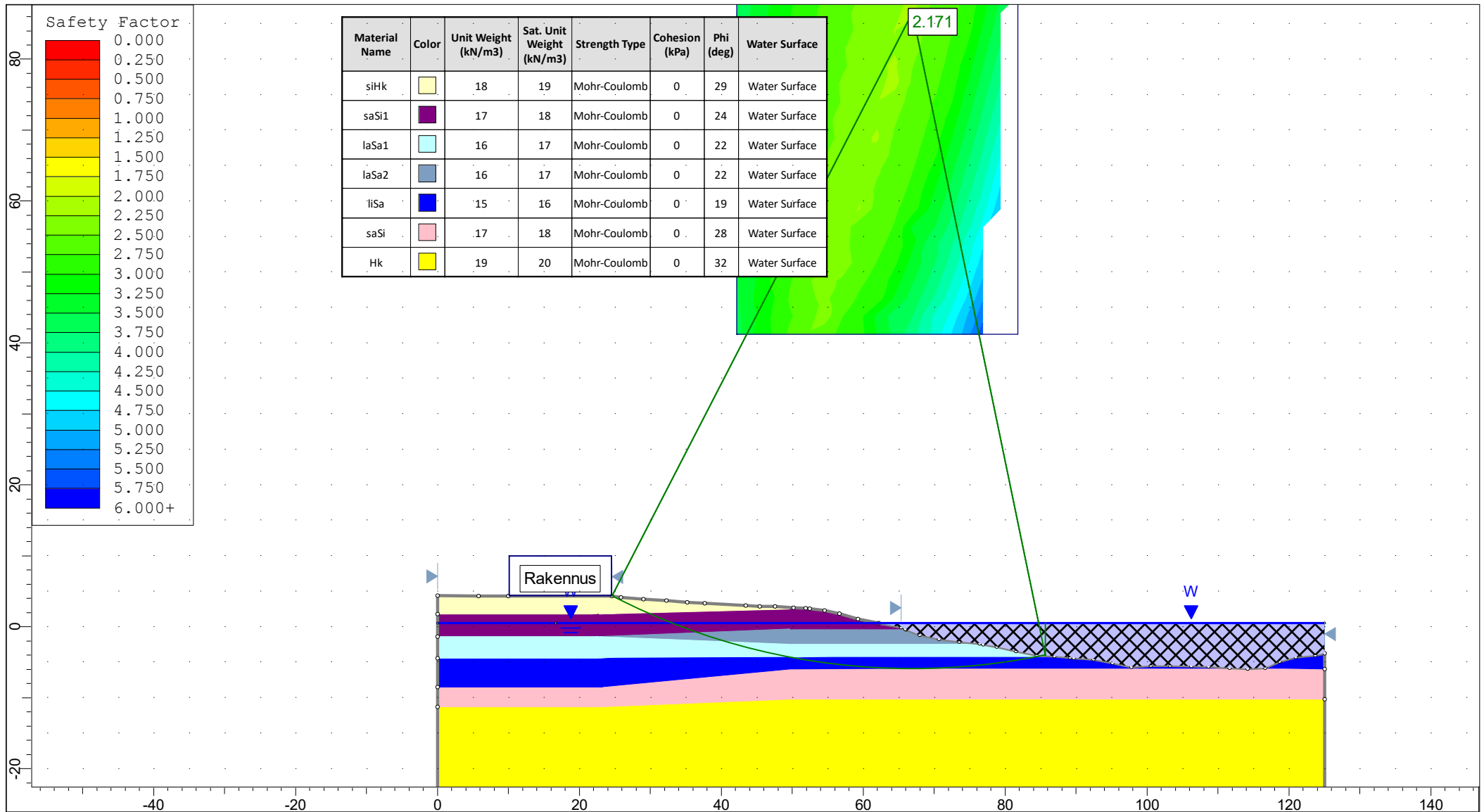
<p>SLIDEINTERPRET 6.027</p>  <p>AFRY ÅF PÖYRY</p> <p>AFRY Finland Oy Elektroniikkatie 13, 90590 Oulu Tel. 010 3311</p>	Project Koivistonluodon ja Harmaalinnan rantojen stabiileettitarkastelu		
	Analysis Description Leikkaus jokipaalu 28 960, Koivistonluoto Pitkäaikainen vakavuus (Avoin), Keskivesi (MW) Kokonaisvarmuusmenetelmä, Bishop		
	Designer Teemu Vehviläinen	Checker Marko Lehmikangas	Scale 1:350
	Date 31.5.2021	File Name Avoin_MW_Bishop.slim	

Liite 2 (6). Koivistonluodon laskentatulosteet




<p>SLIDEINTERPRET 6.022</p>  <p>AFRY ÄF PÖRY</p> <p>AFRY Finland Oy Elektroniikkatie 13, 90590 Oulu Tel. 010 3311</p>	Project			Koivistonluodon ja Harmaalinnan rantojen stabiileettitarkastelu		
	Analysis Description			Leikkaus jokipaalu 28 960, Koivistonluoto Pitkäaikainen vakavuus (Avoin), Nopea vedenpinnan lasku (MW-NW) Kokonaisvarmuusmenetelmä, Bishop		
	Designer			Teemu Vehviläinen	Checker	Marko Lehmikangas
	Date			31.5.2021	File Name	Avoin_MW-NW_Bishop.slim
				Scale		1:350

Liite 2 (7). Koivistonluodon laskentatulosteet



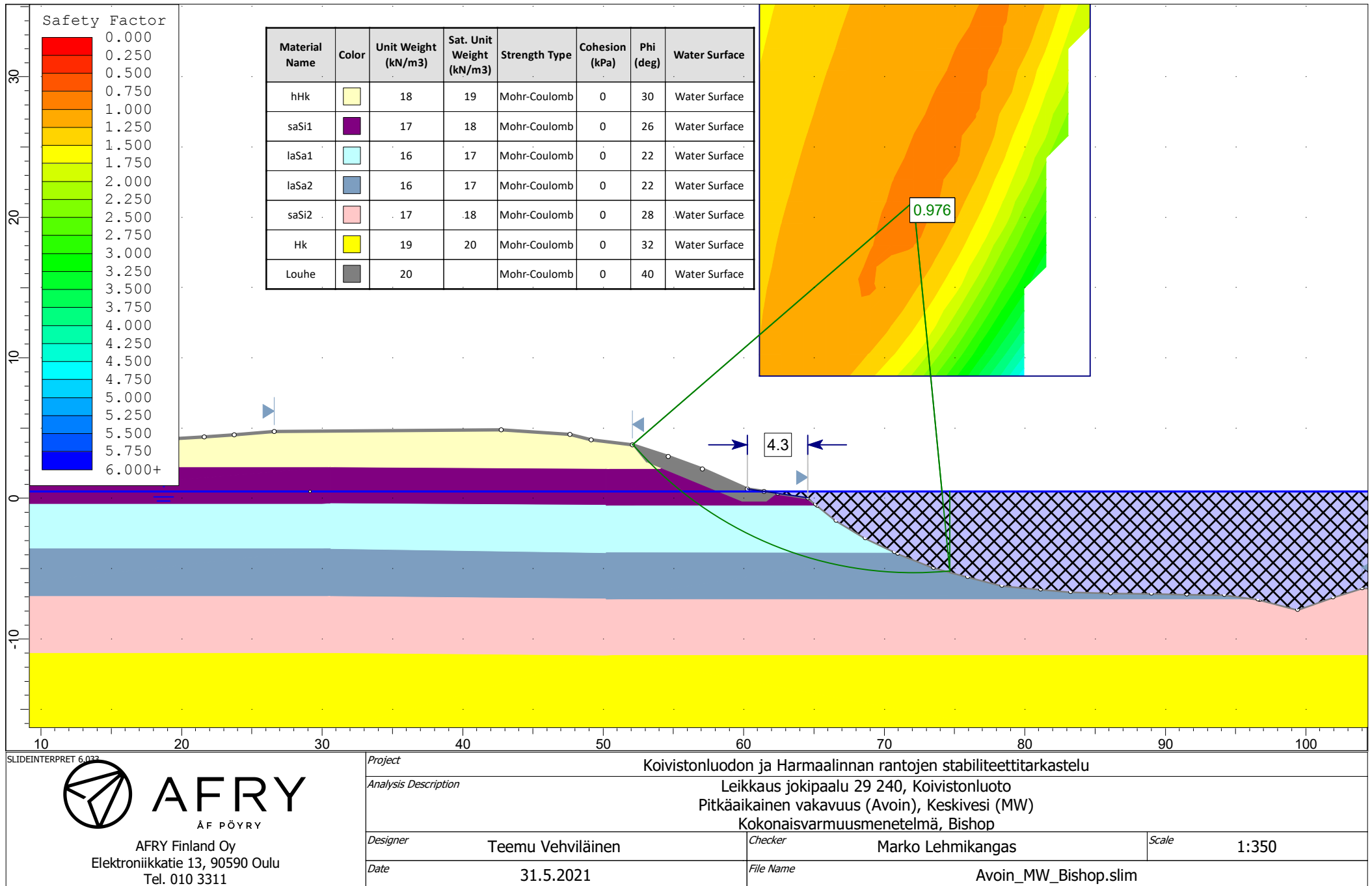
SLIDEINTERPRET 6.027

**AFRY**
ÄF PÖRY

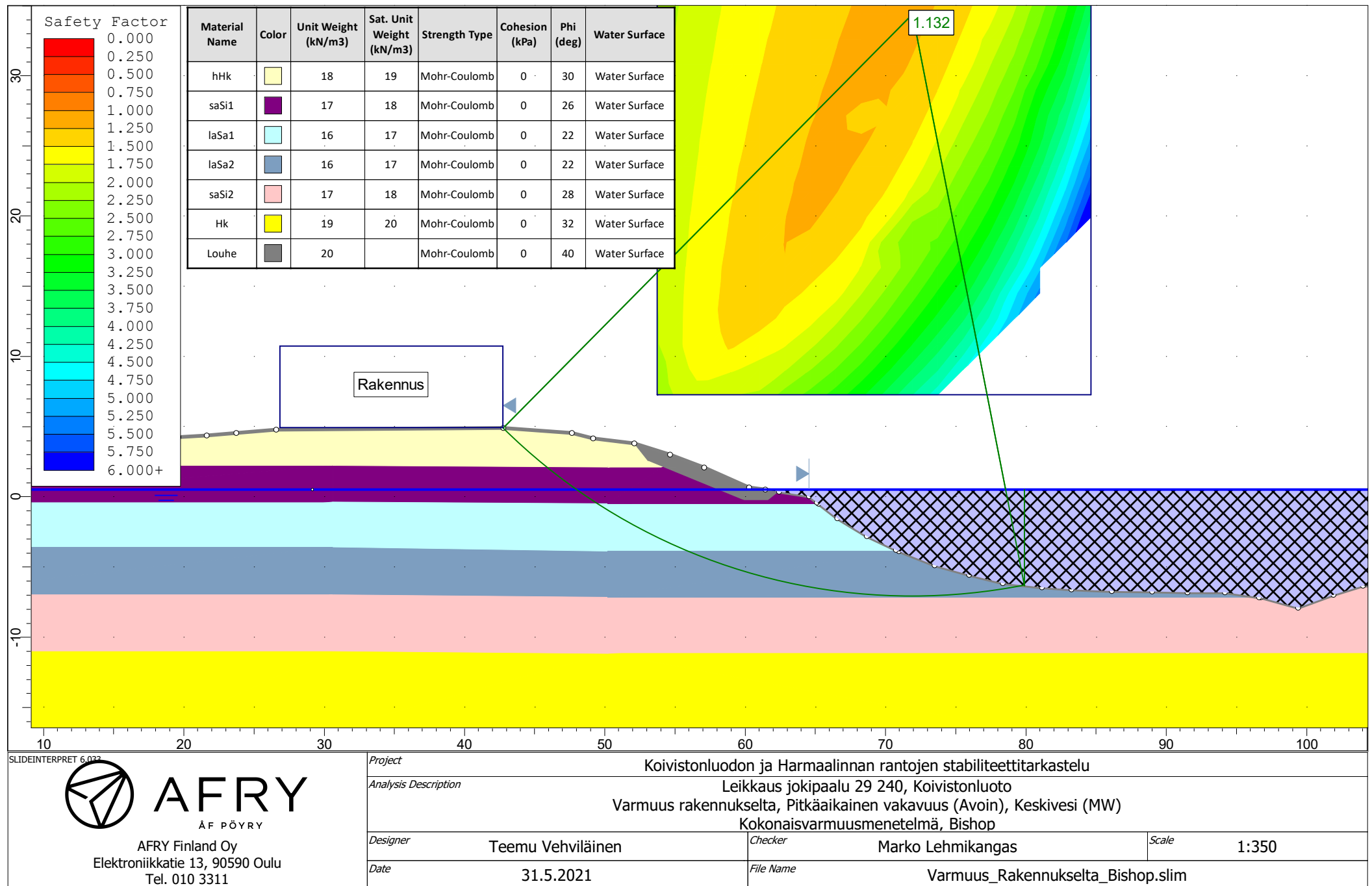
AFRY Finland Oy
Elektroniikkatie 13, 90590 Oulu
Tel. 010 3311

ProjectKoivistonluodon ja Harmaalinnan rantojen stabiileittitarkastelu			
Analysis DescriptionLeikkaus jokipaalu 28 960, Koivistonluoto Varmuus rakennukselta, Pitkäaikainen vakavuus (Avoin), Keskivesi (MW) Kokonaisvarmuusmenetelmä, Bishop			
Designer	Teemu Vehviläinen	Checker	Marko Lehmikangas
		Scale	1:750
Date	31.5.2021	File Name	Varmuus_Rakennukselta_Bishop.slim

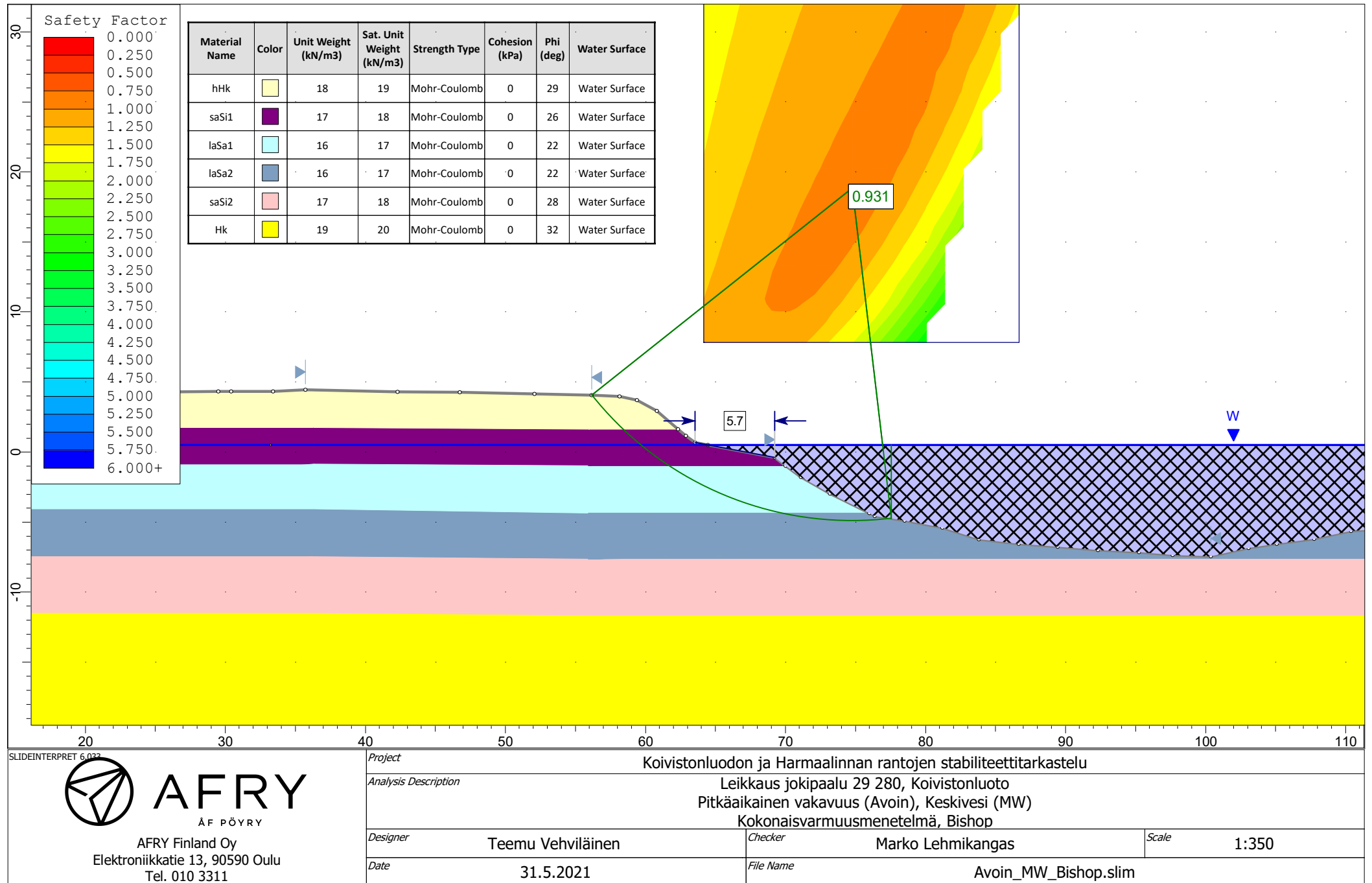
Liite 2 (8). Koivistonluodon laskentatulosteet



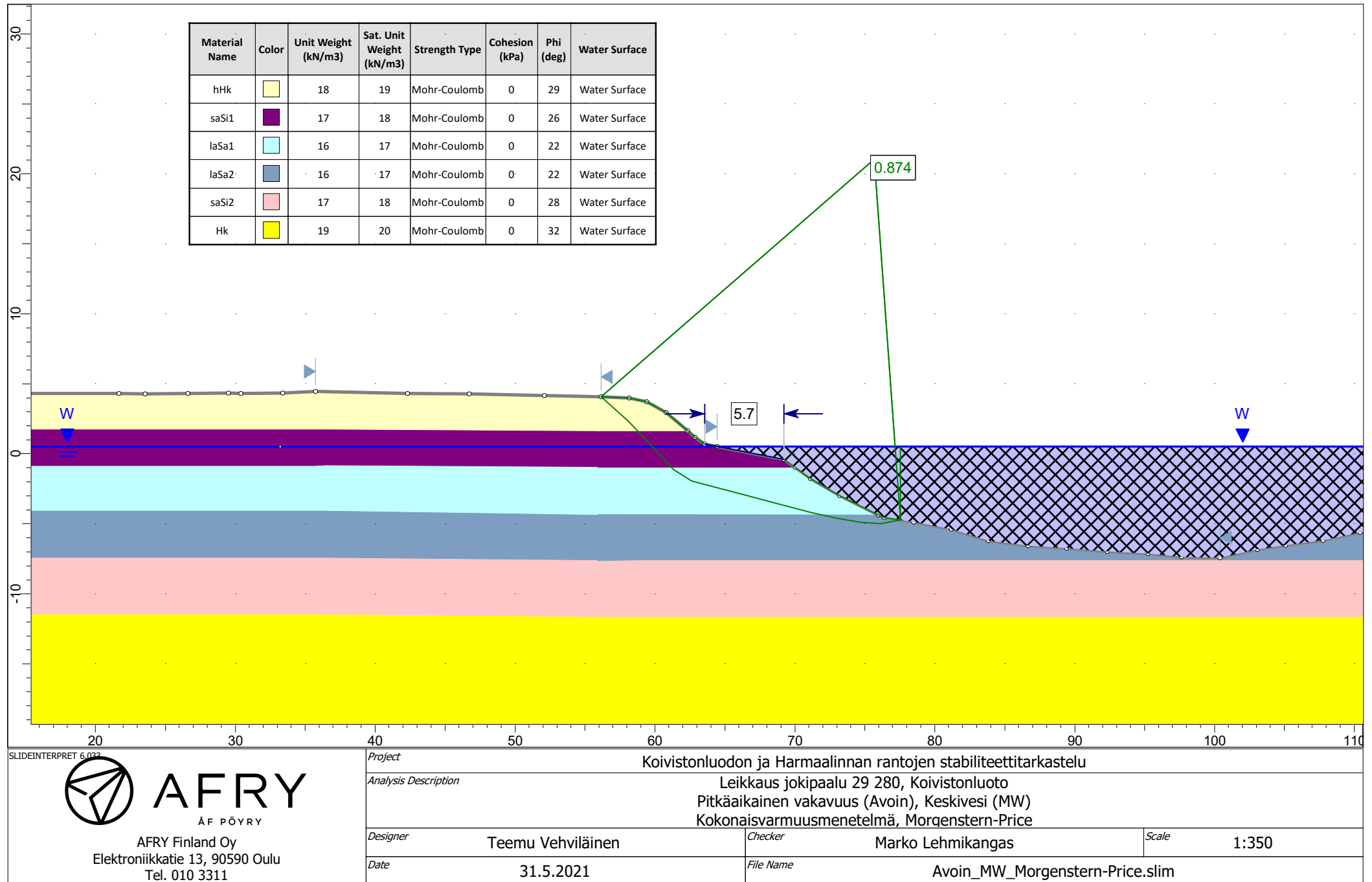
Liite 2 (9). Koivistonluodon laskentatulosteet



Liite 2 (10). Koivistonluodon laskentatulosteet



Liite 2 (11). Koivistonluodon laskentatulosteet



SLIDEINTERPRET 6.023


AFRY

AF PÖYRY

AFRY Finland Oy
Elektroniikkatie 13, 90590 Oulu
Tel. 010 3311

Project

Koivistonluodon ja Harmaalinnan rantojen stabiileettitarkastelu

Analysis Description

Leikkaus jokipaalu 29 280, Koivistonluoto
Pitkäaikainen vakavuus (Avoin), Keskivesi (MW)
Kokonaisvarmuusmenetelmä, Morgenstern-Price

Designer

Teemu Vehviläinen

Checker

Marko Lehmikangas

Scale

1:350

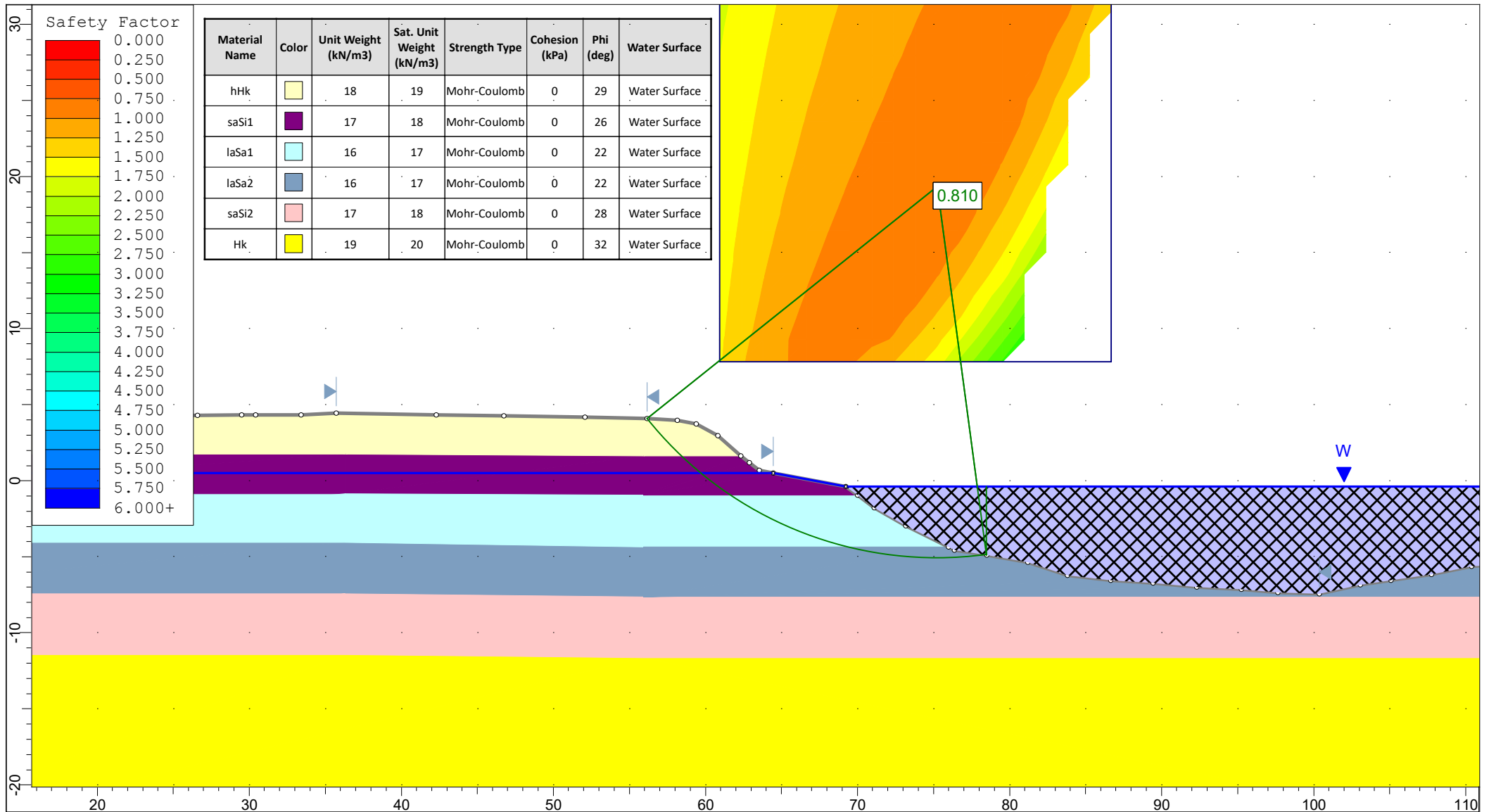
Date

31.5.2021


File Name

Avoin_MW_Morgenstern-Price.slim

Liite 2 (12). Koivistonluodon laskentatulosteet



SLIDEINTERPRET 6.027



AFRY

ÅF PÖYRY

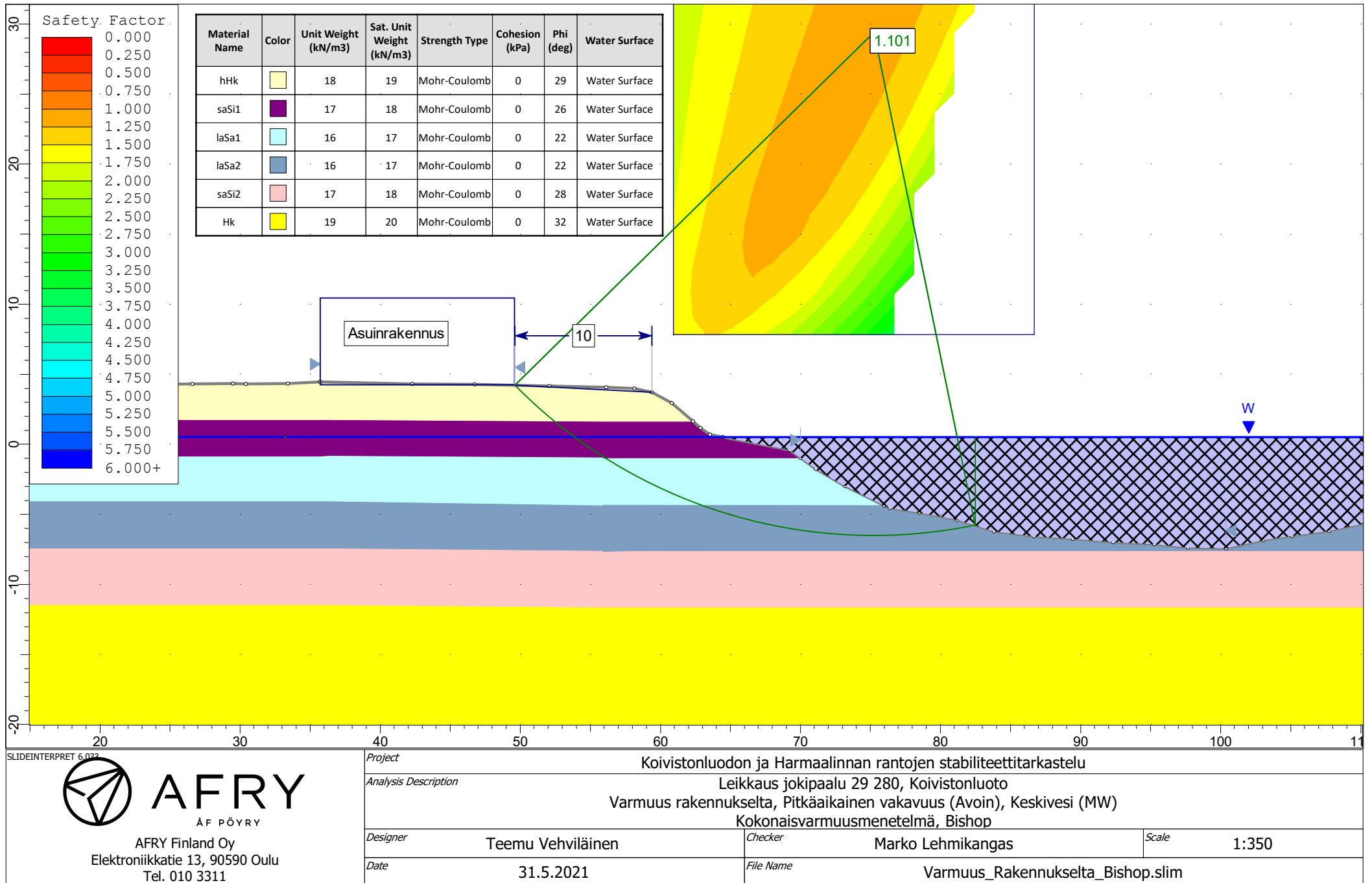
AFRY Finland Oy

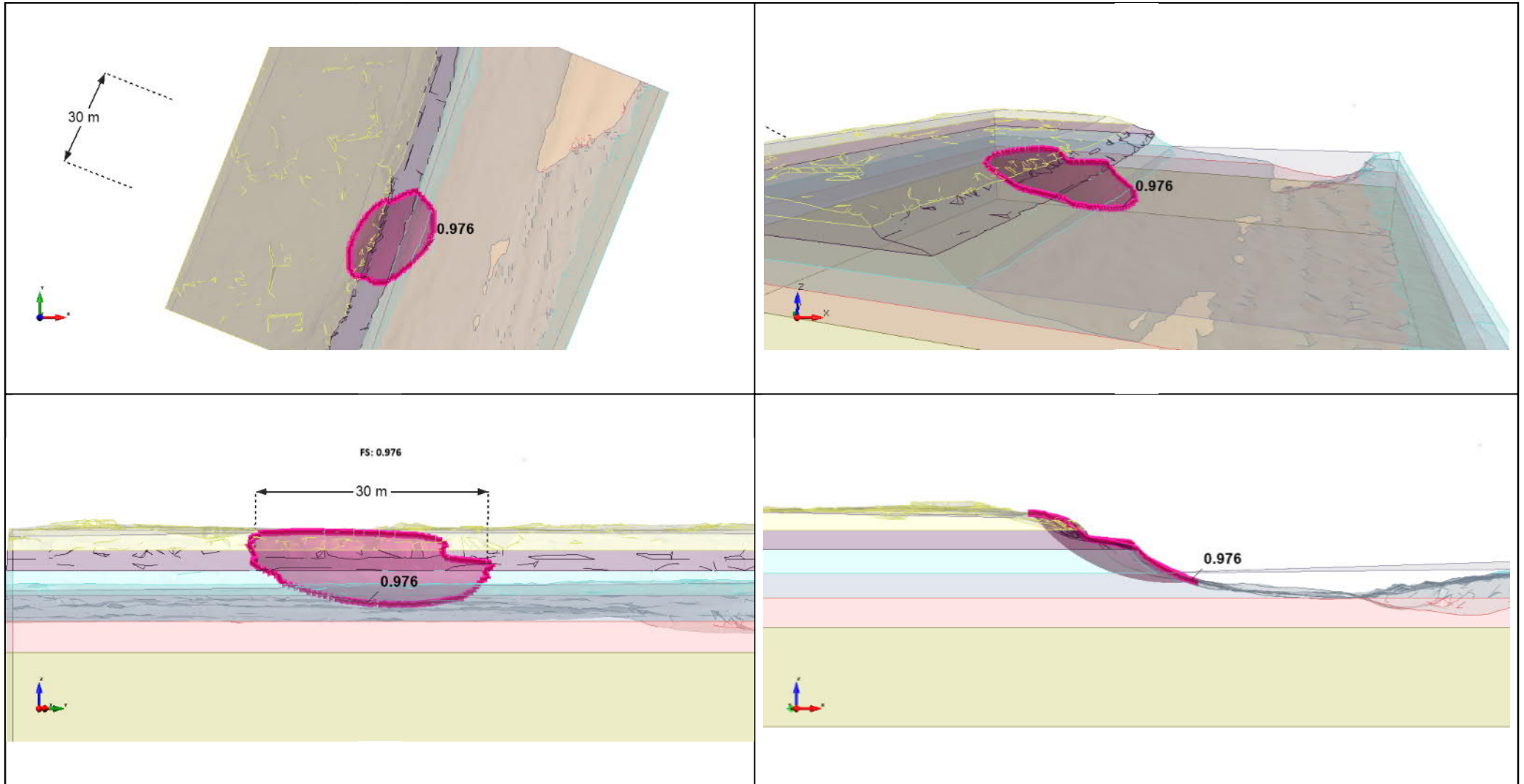
Elektroniikkatie 13, 90590 Oulu

Tel. 010 3311

Project		Koivistonluodon ja Harmaalinnan rantojen stabiileettitarkastelu	
Analysis Description		Leikkaus jokipaalu 29 280, Koivistonluoto Pitkäaikainen vakavuus (Avoin), Nopea vedenpinnan lasku (MW-NW) Kokonaisvarmuusmenetelmä, Bishop	
Designer	Teemu Vehviläinen	Checker	Marko Lehmikangas
Date	31.5.2021	File Name	Avoin_MW-NW_Bishop.slim
		Scale	1:350

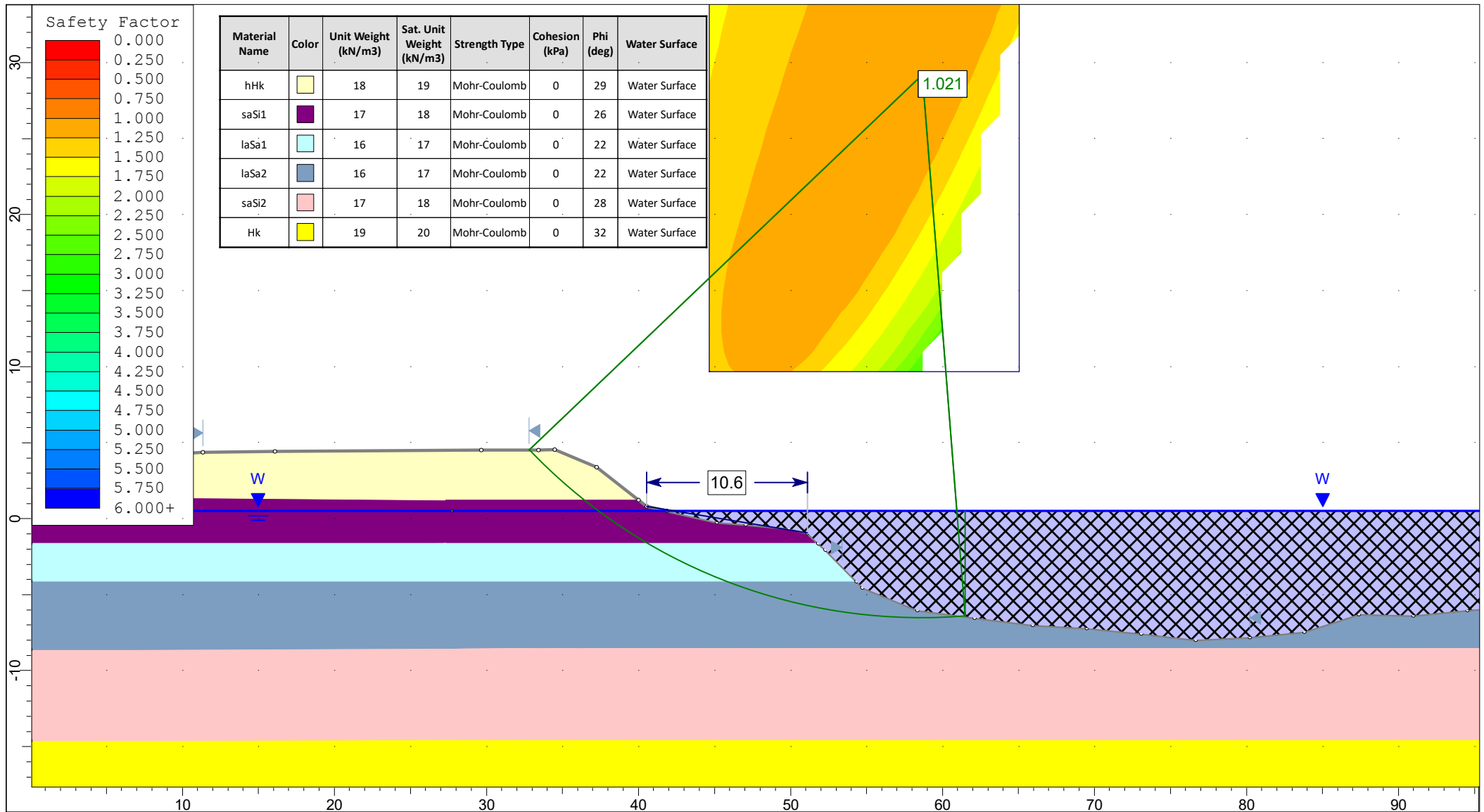
Liite 2 (13). Koivistonluodon laskentatulosteet






Project Koivistonluodon ja Harmaalinnan rantojen stabiileettitarkastelu		
Author Teemu Vehviläinen		Company AFRY Finland Oy
Date June 15 2021, 12:02 PM		File Name 29280_Koivistonluoto.slide3m2
Analysis Jokipaalu 29 280, Koivistonluoto, Pitkäaikainen vakavuus (Avoin), Keskivesi (MW), Kokonaisvarmuusmenetelmä, Ellipsoidi liukupinta		

Liite 2 (15). Koivistonluodon laskentatulosteet



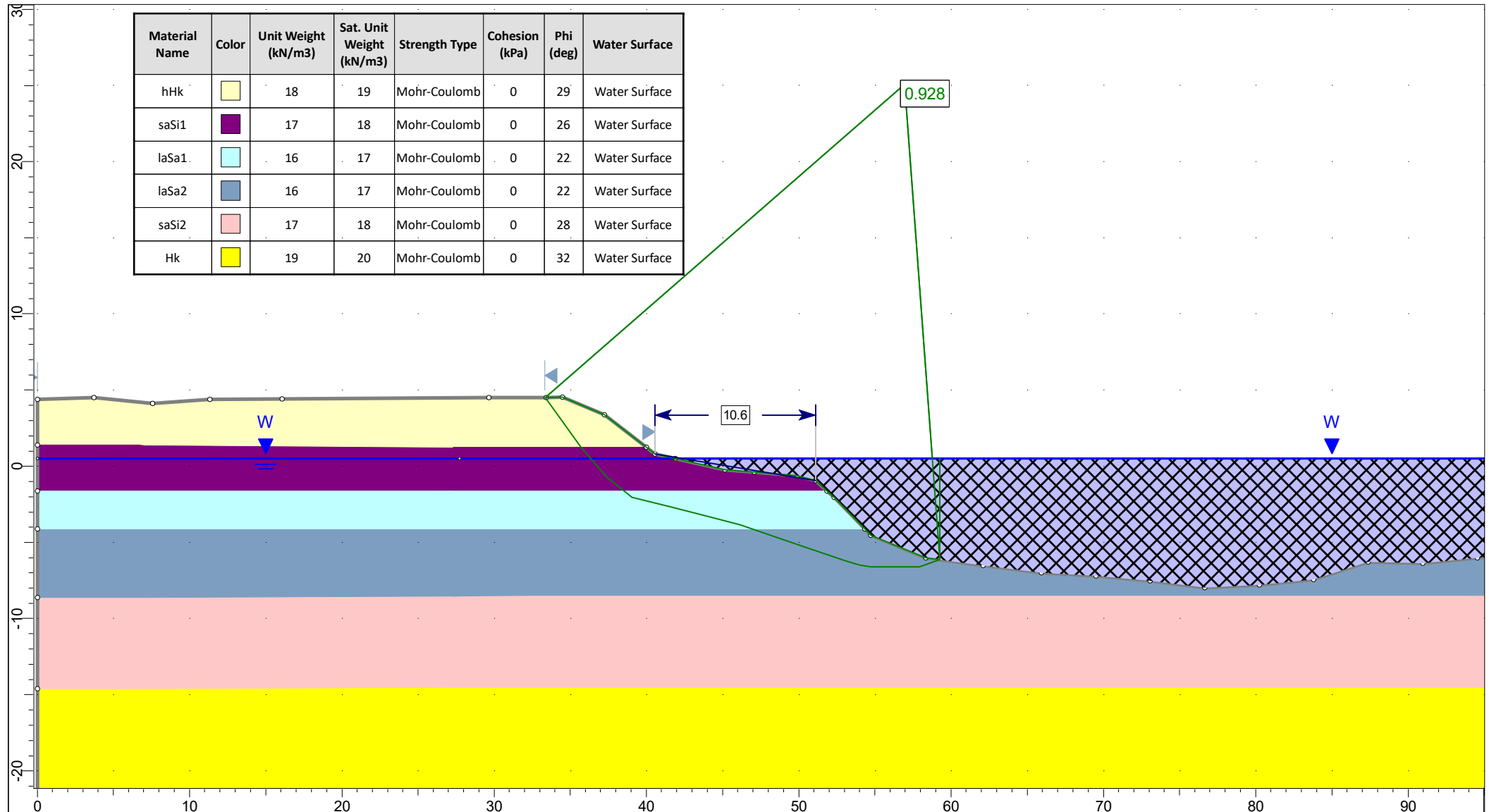
SLIDEINTERPRET 6.027

**AFRY**
AF PÖYRY

AFRY Finland Oy
Elektroniikkatie 13, 90590 Oulu
Tel. 010 3311

<i>Project</i>		Koivistonluodon ja Harmaalinnan rantojen stabiileettitarkastelu	
<i>Analysis Description</i>		Leikkaus jokipaalu 29 380, Koivistonluoto Pitkäaikainen vakavuus (Avoin), Keskivesi (MW) Kokonaisvarmuusmenetelmä, Bishop	
<i>Designer</i>	Teemu Vehviläinen	<i>Checker</i>	Marko Lehmikangas
<i>Date</i>	31.5.2021	<i>File Name</i>	Avoin_MW_Bishop.slim
		<i>Scale</i>	1:350

Liite 2 (16). Koivistonluodon laskentatulosteet



SLIDEINTERPRET 6.027



AFRY

AF PÖYRY

AFRY Finland Oy
Elektroniikkatie 13, 90590 Oulu
Tel. 010 3311

Project

Koivistonluodon ja Harmaalinnan rantojen stabiilitetitarkastelu

Analysis Description

Leikkaus jokipaalu 29 380, Koivistonluoto
Pitkäaikainen vakavuus (Avoin), Keskivesi (MW)
Kokonaisvarmuusmenetelmä, Morgenstern-Price

Designer

Teemu Vehviläinen

Checker

Marko Lehmikangas

Scale

1:350

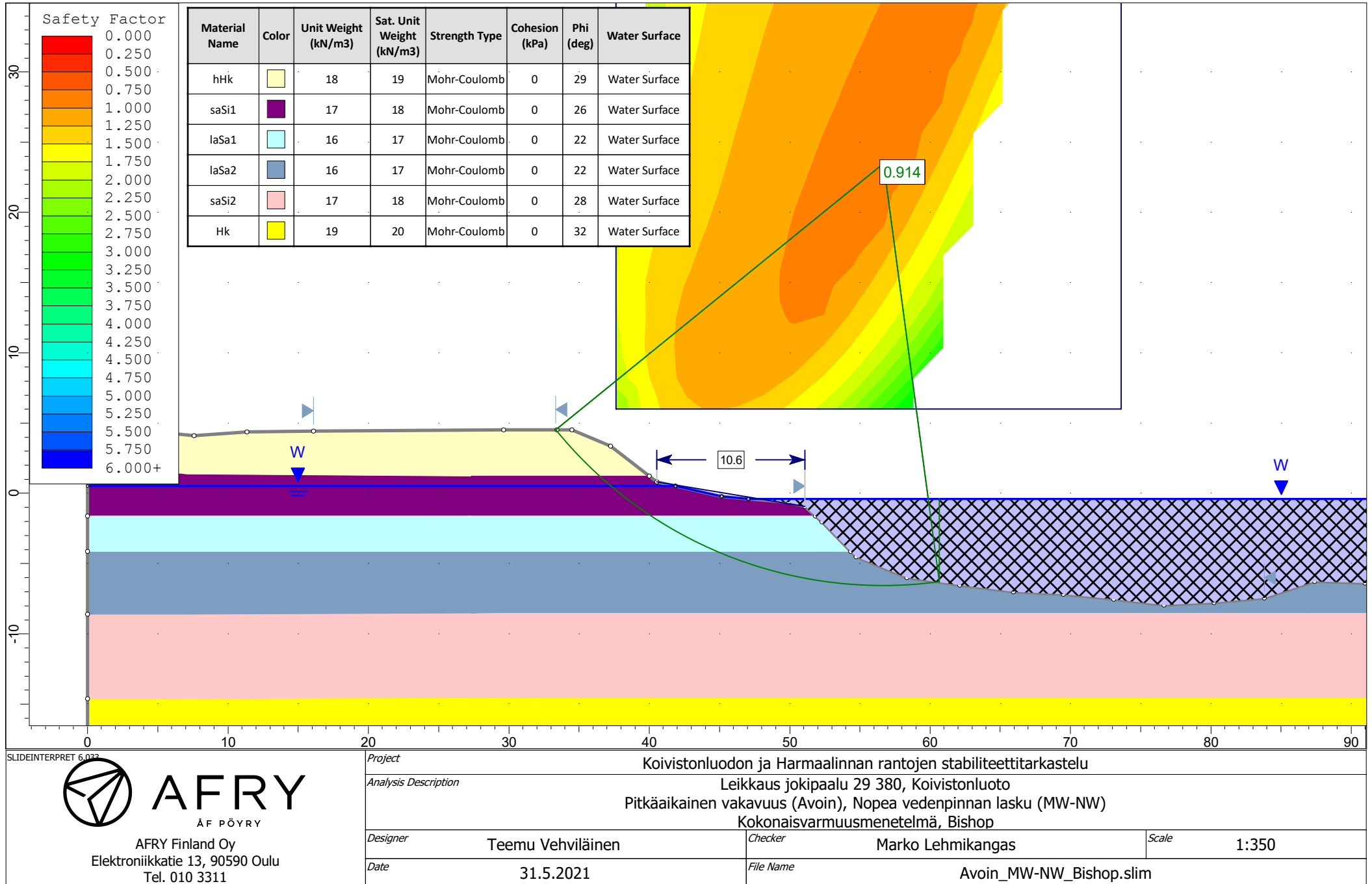
Date

31.5.2021

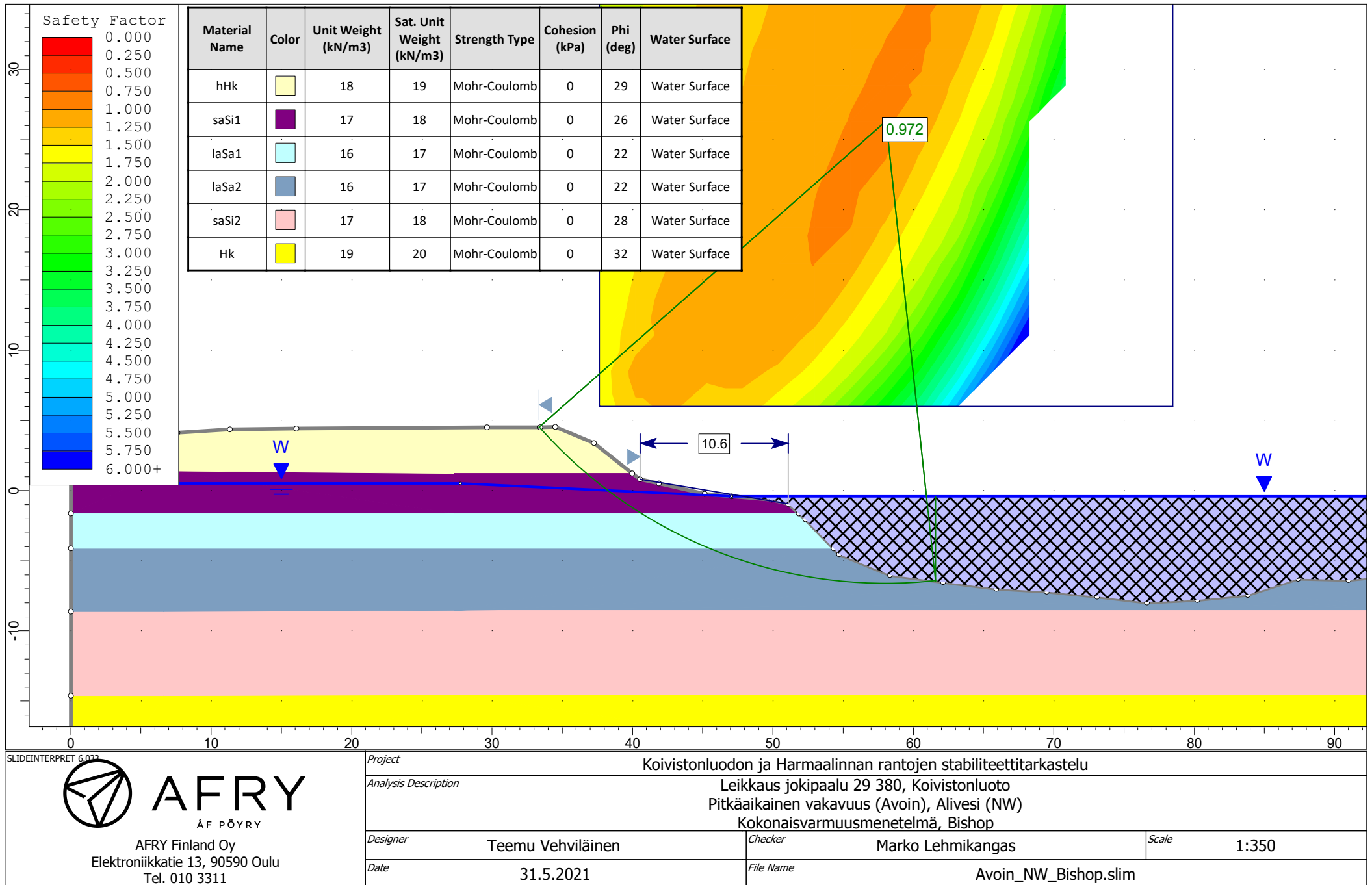
File Name

Avoin_MW_Morgenstern-Price.slim

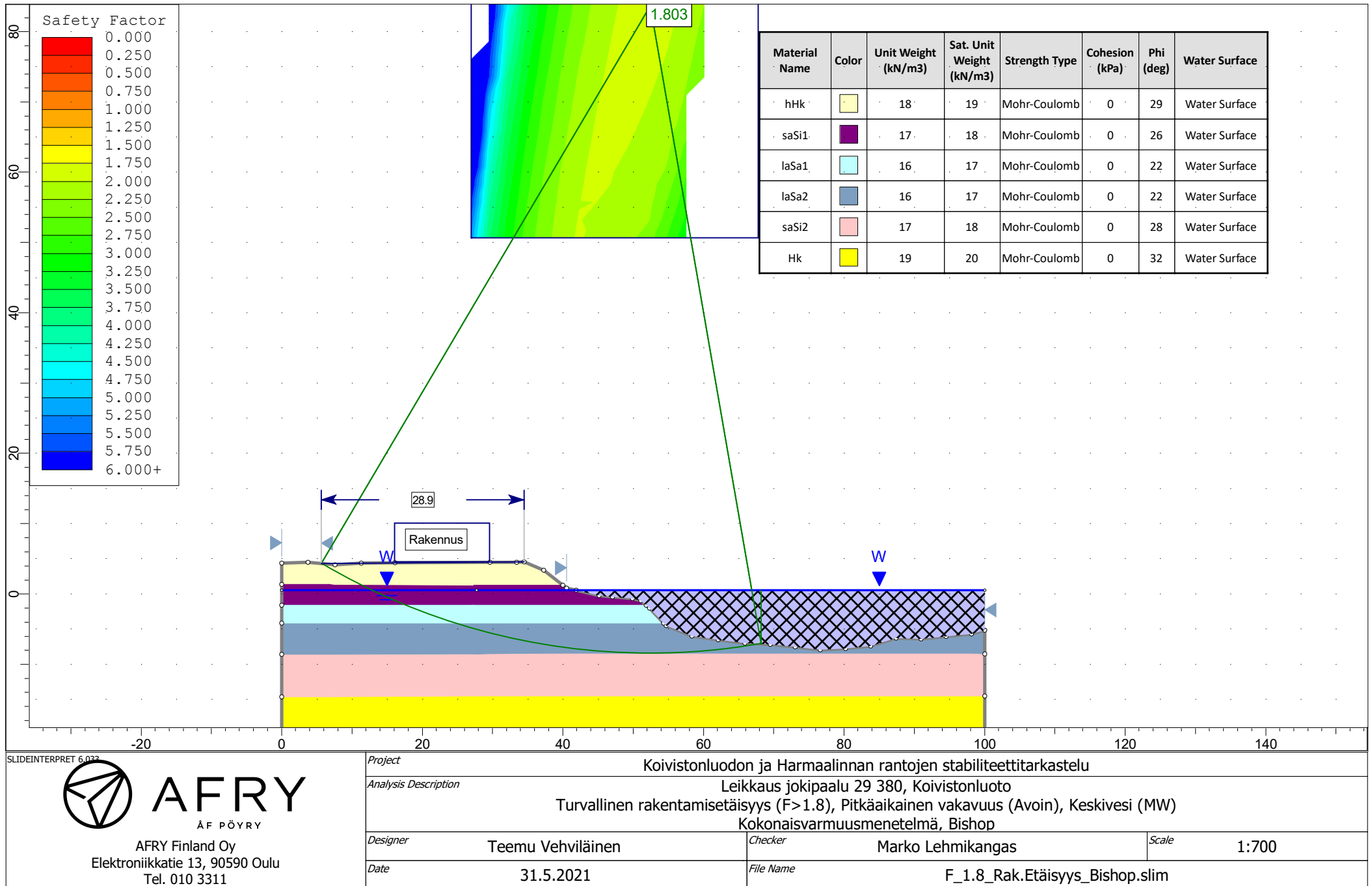
Liite 2 (17). Koivistonluodon laskentatulosteet



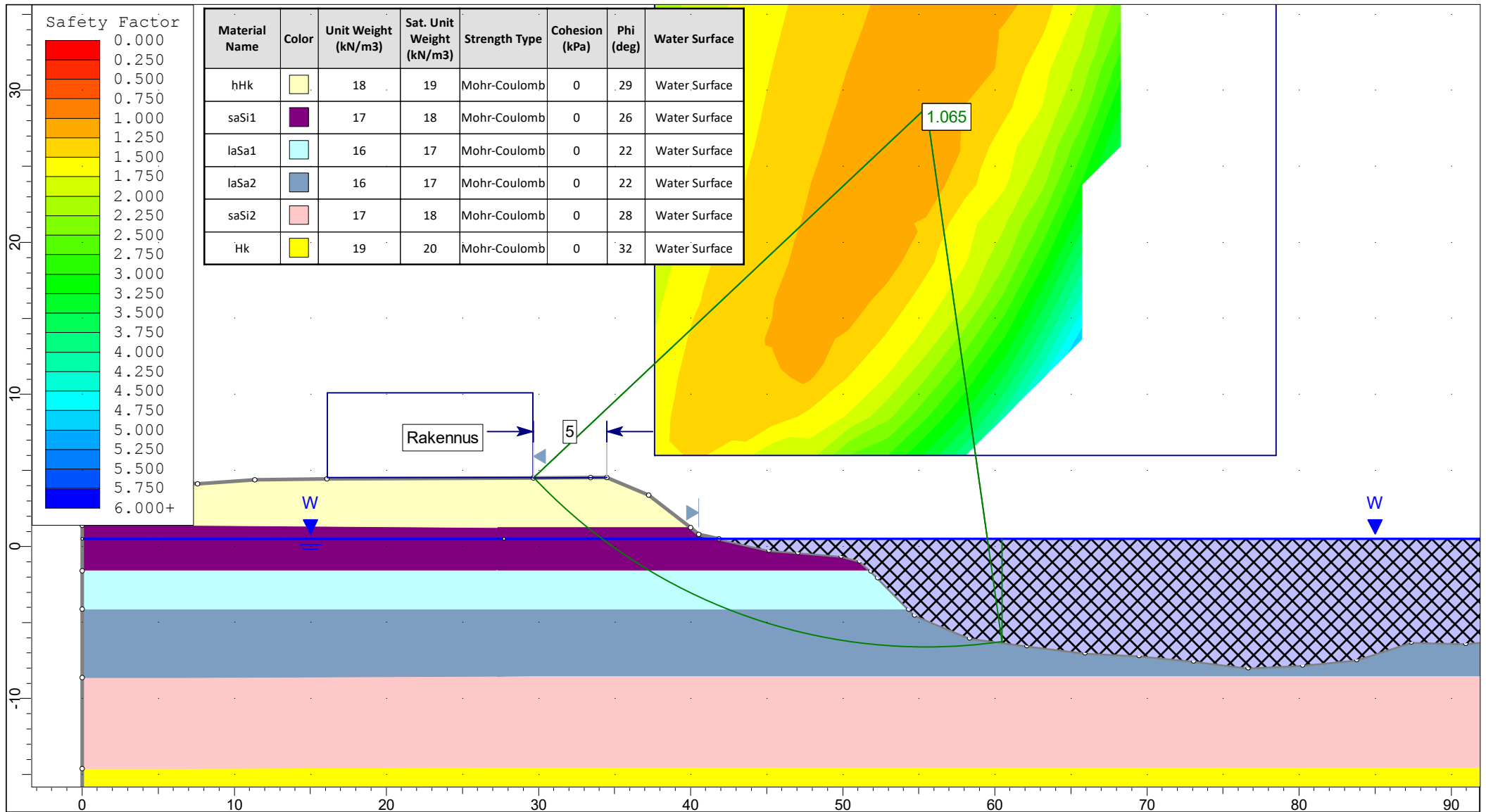
Liite 2 (18). Koivistonluodon laskentatulosteet




Liite 2 (19). Koivistonluodon laskentatulosteet



Liite 2 (20). Koivistonluodon laskentatulosteet



SLIDEINTERPRET 6.032

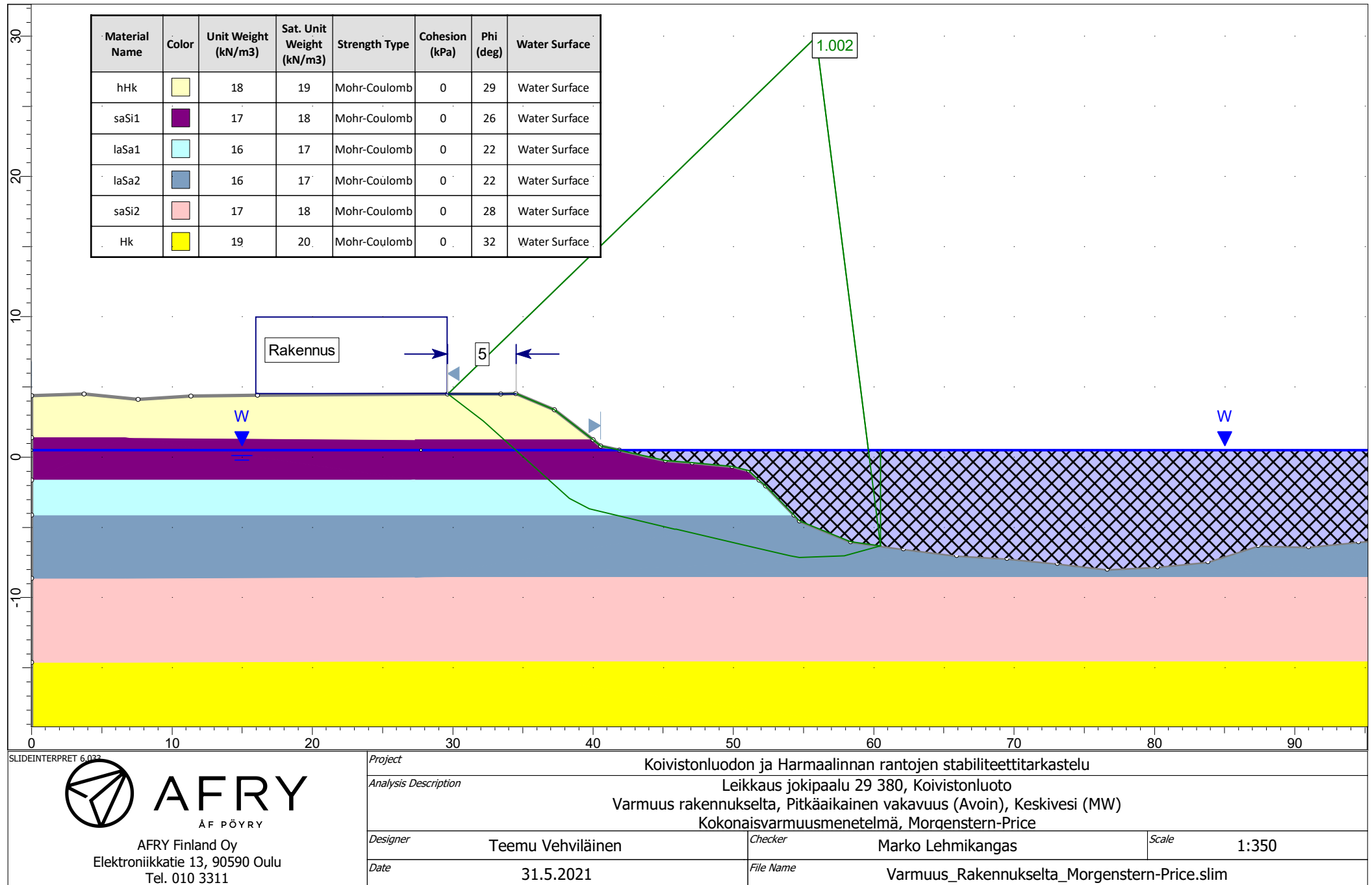


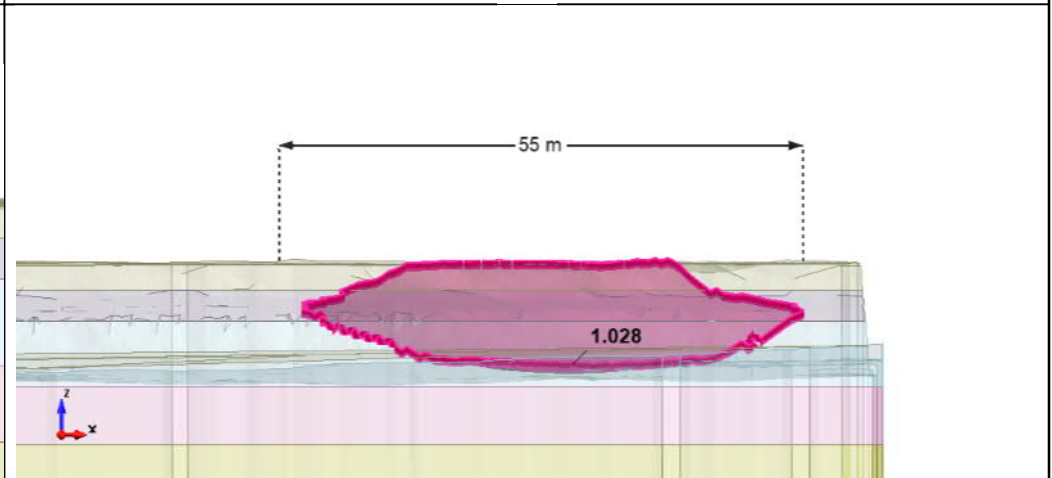
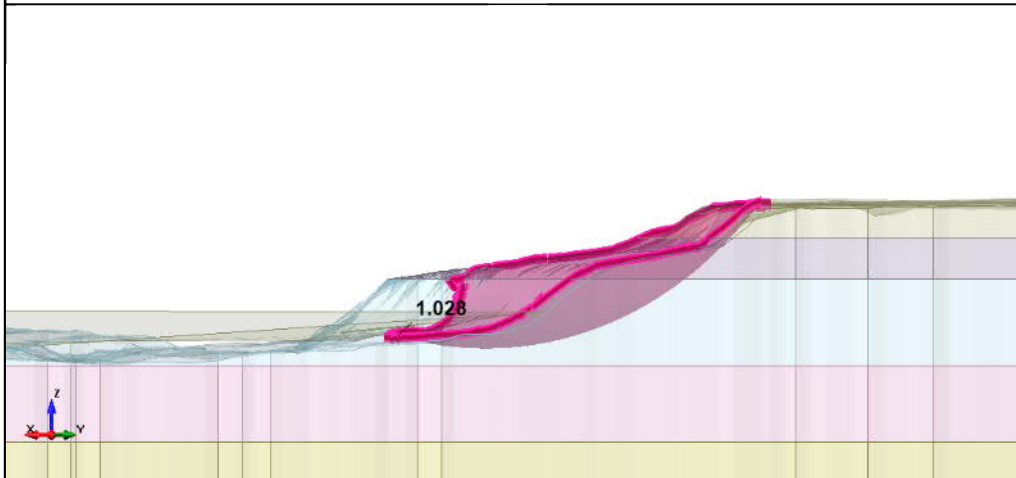
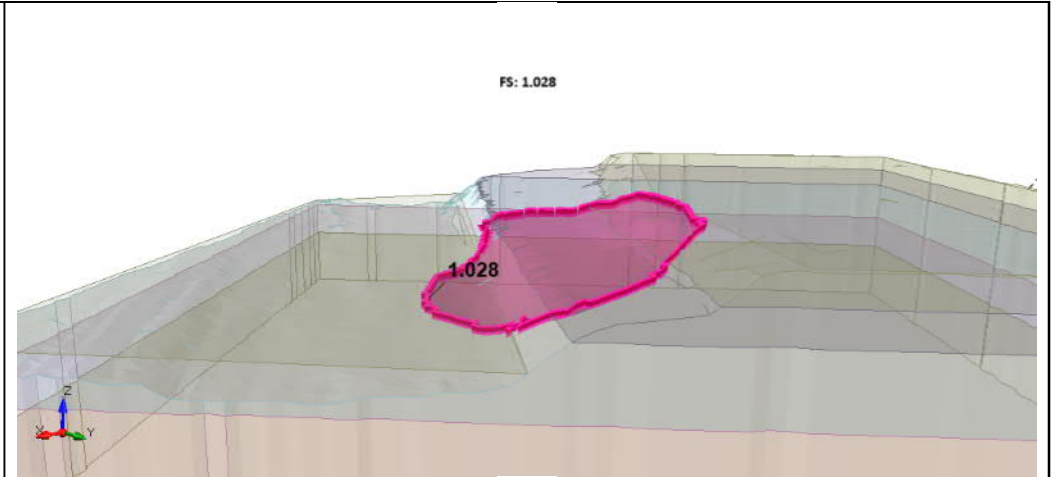
AFRY
AF PÖYRY

AFRY Finland Oy
Elektroniikkatie 13, 90590 Oulu
Tel. 010 3311

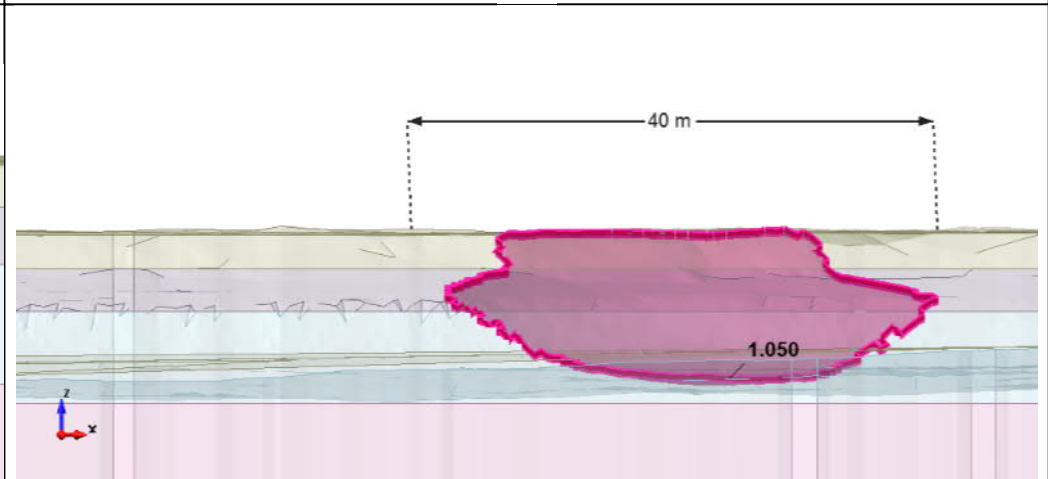
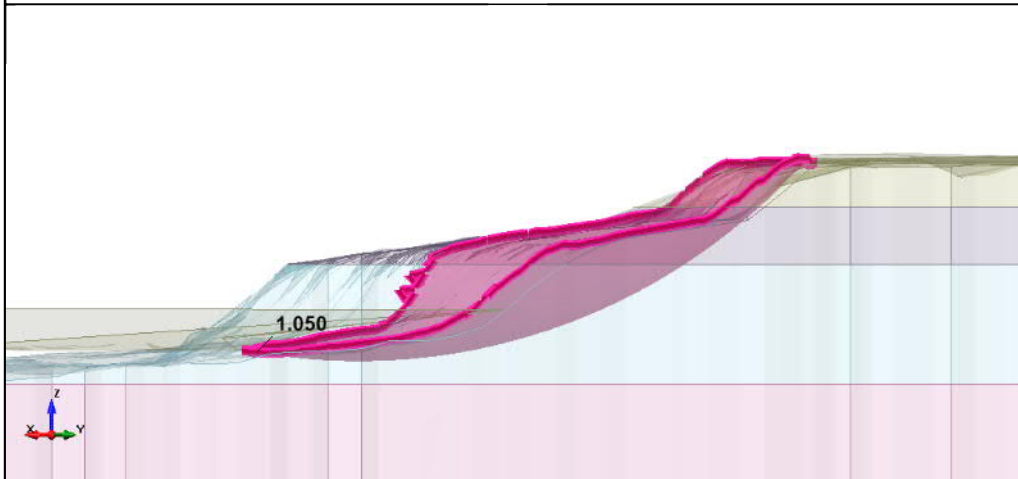
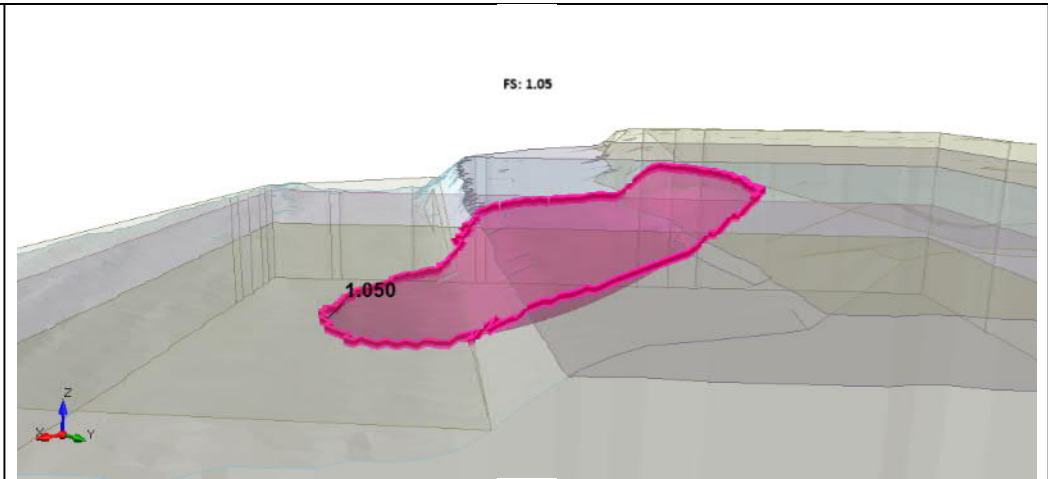
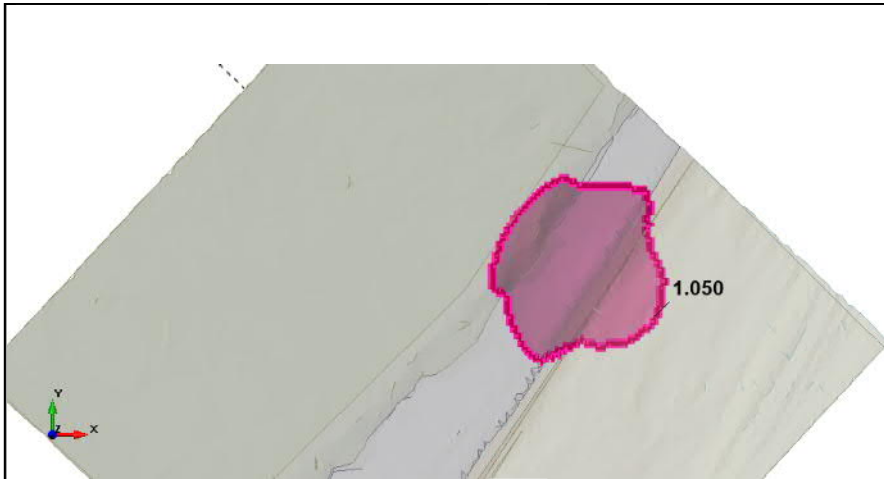
Project		Koivistonluodon ja Harmaalinnan rantojen stabiileettitarkastelu	
Analysis Description		Leikkaus jokipaalu 29 380, Koivistonluoto Varmuus rakennukselta, Pitkäaikainen vakavuus (Avoin), Keskivesi (MW) Kokonaisvarmuusmenetelmä, Bishop	
Designer	Teemu Vehviläinen	Checker	Marko Lehmikangas
Date	31.5.2021	Scale	1:350
		File Name	Varmuus_Rakennukselta_Bishop.slim

Liite 2 (21). Koivistonluodon laskentatulosteet





Project		Koivistonluodon ja Harmaalinnan rantojen stabiileittitarkastelu	
Author		Teemu Vehviläinen	Company AFRY Finland Oy
Date		June 15 2021, 03:44 PM	File Name 29380_Koivistonluoto.slide3m2
Analysis Jokipaalu 29380, Koivistonluoto, Pitkäaikainen vakavuus (Avoin), Keskivesi (MW), Kokonaisvarmuusmenetelmä, Ellipsoidi liukupinta			



Project

Koivistonluodon ja Harmaalinnan rantojen stabiileettitarkastelu

Author

Teemu Vehviläinen

Company

AFRY Finland Oy

Date

June 15 2021, 03:53 PM

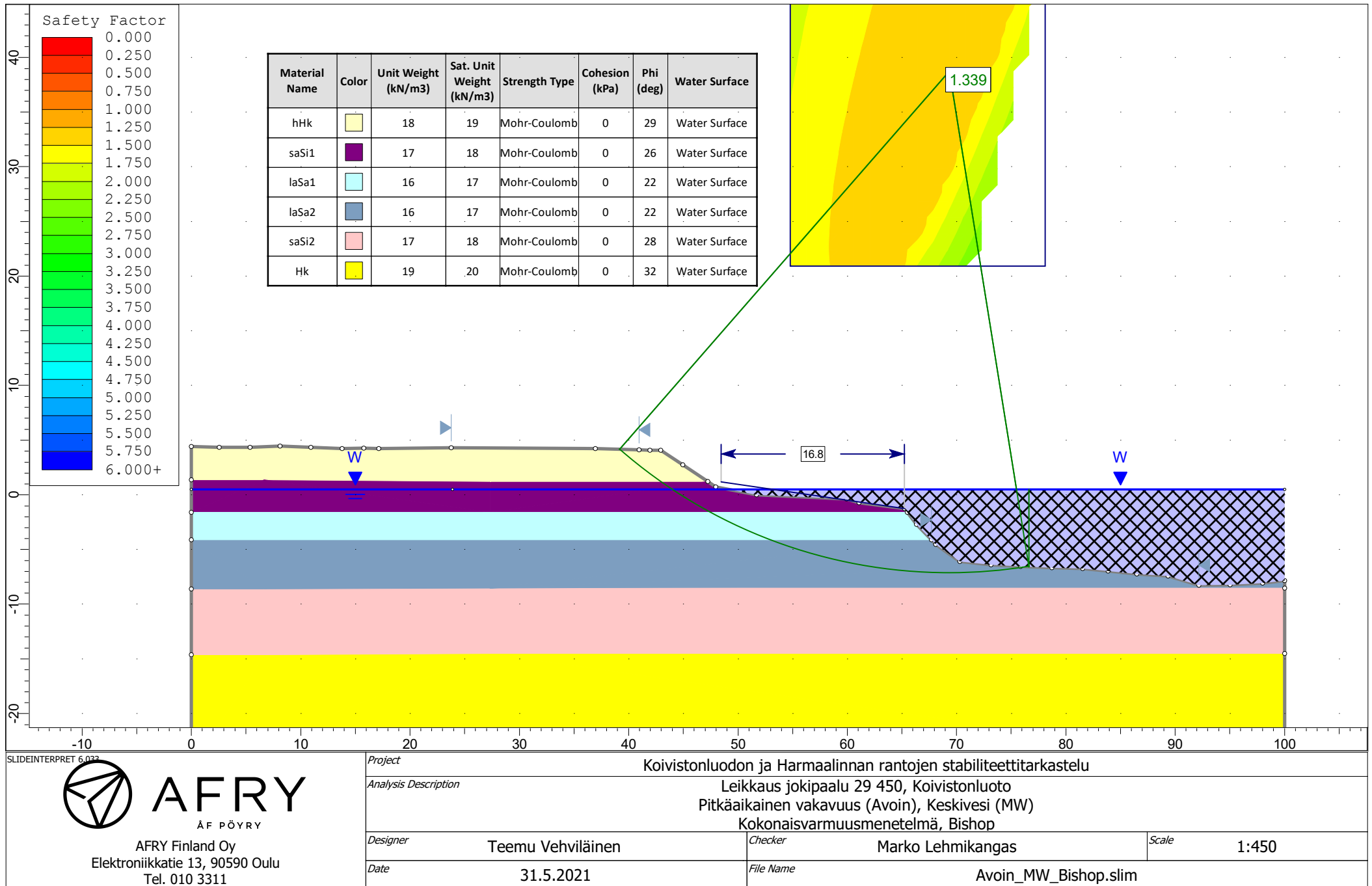
File Name

29380_Koivistonluoto.slide3m2

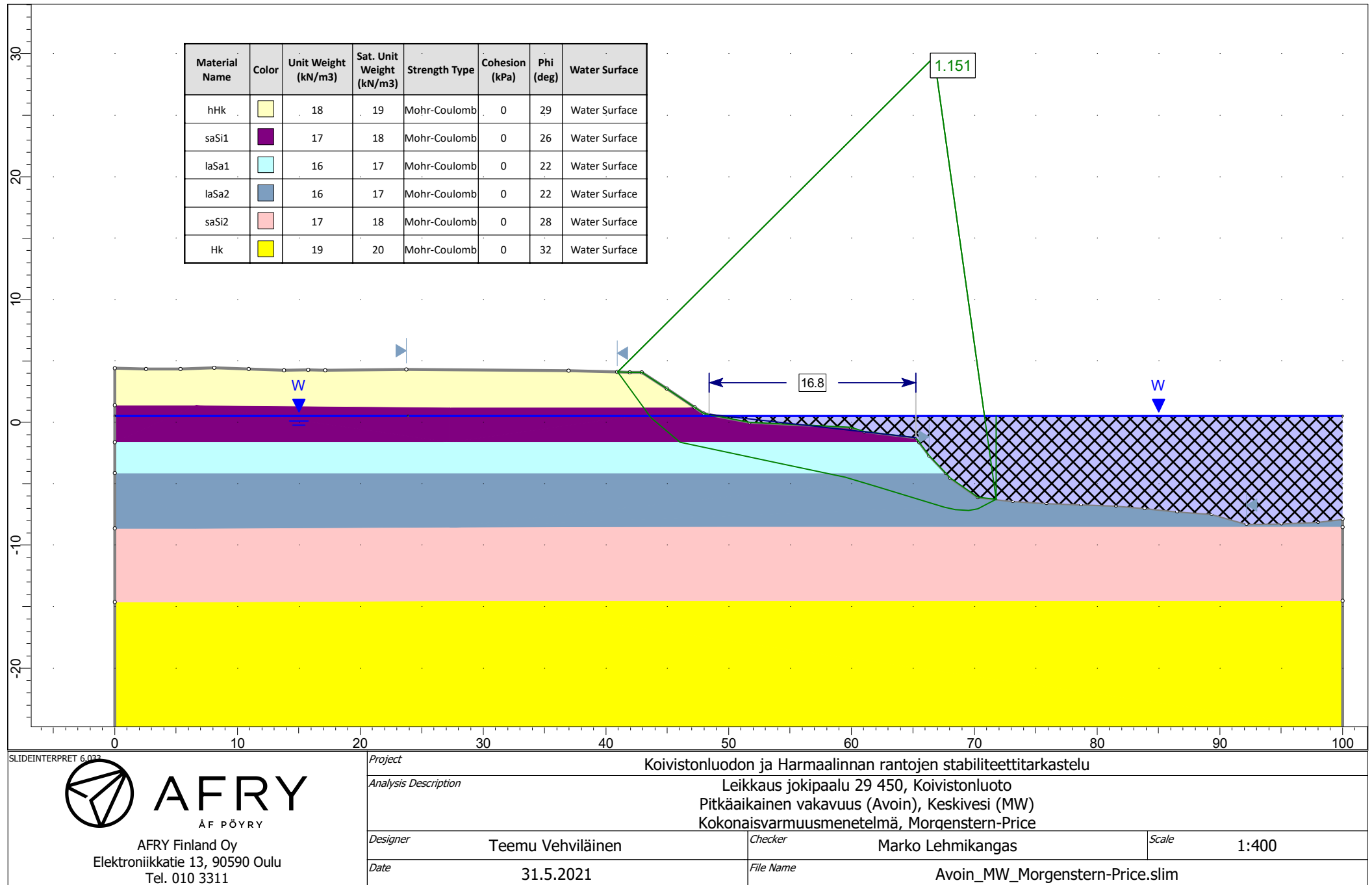
Analysis

Jokipaalu 29380, Koivistonluoto, Pitkäaikainen vakavuus (Avoin), Keskivesi (MW), Kokonaisvarmuusmenetelmä, Pallo liukupinta

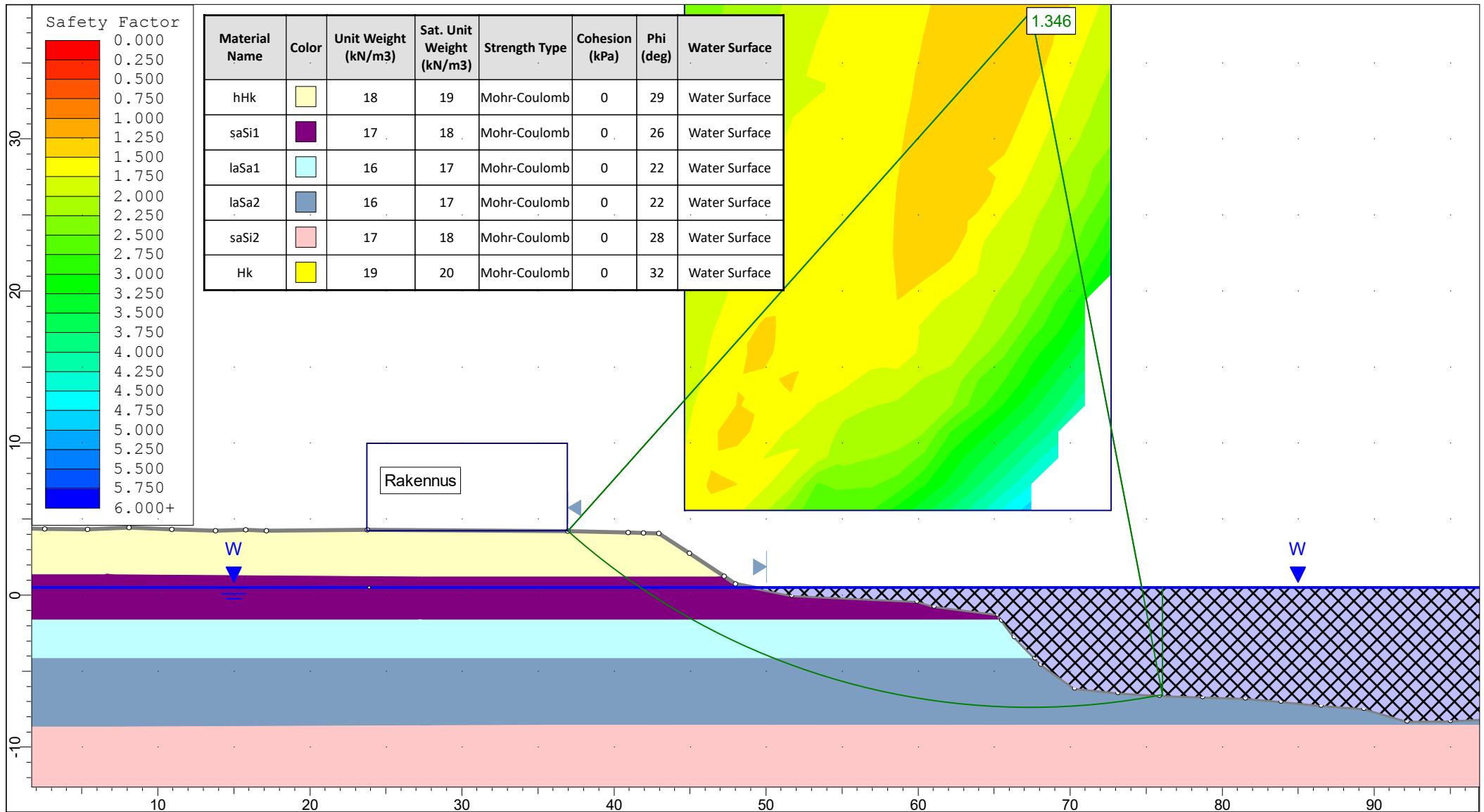
Liite 2 (24). Koivistonluodon laskentatulosteet




Liite 2 (25). Koivistonluodon laskentatulosteet



Liite 2 (26). Koivistonluodon laskentatulosteet

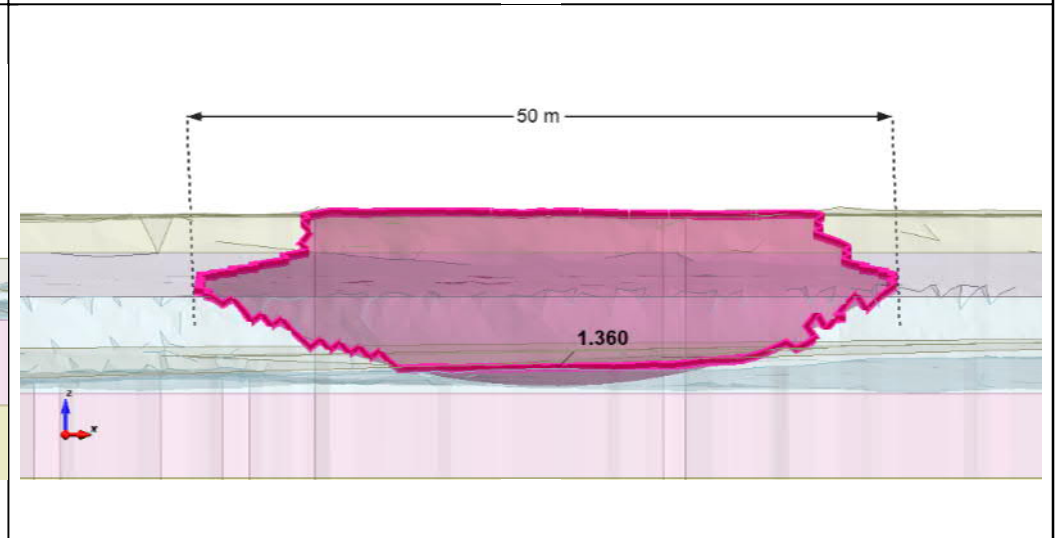
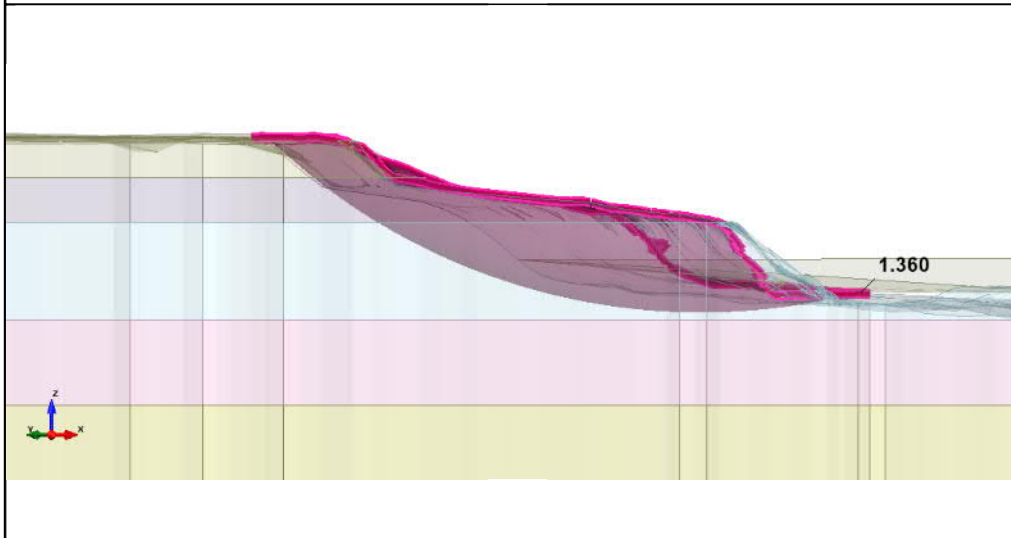
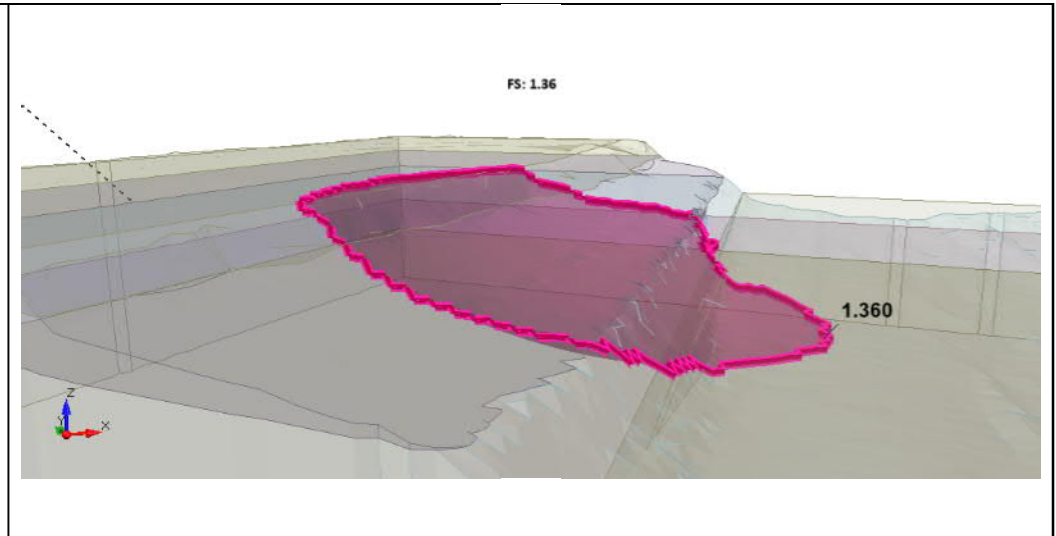
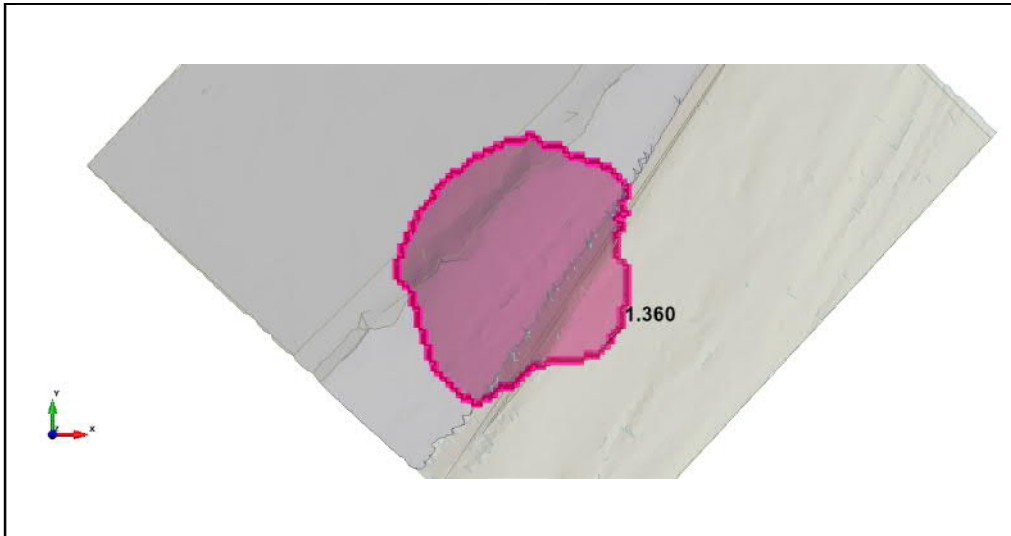


SLIDEINTERPRET 6.022

**AFRY**
ÄF PÖYRY

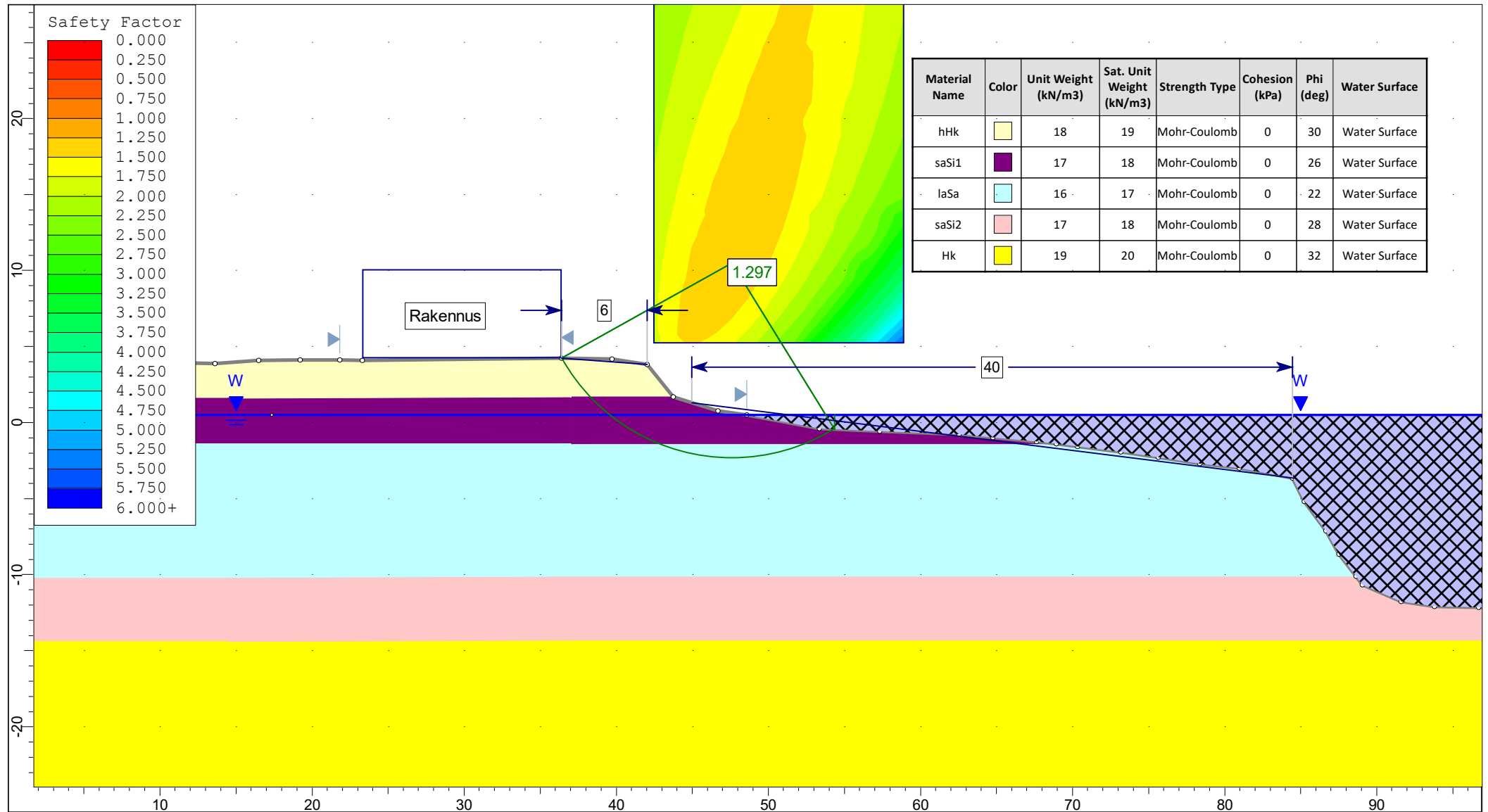
AFRY Finland Oy
Elektroniikkatie 13, 90590 Oulu
Tel. 010 3311

<i>Project</i>		Koivistonluodon ja Harmaalinnan rantojen stabiilitetarkastelu	
<i>Analysis Description</i>		Leikkaus jokipaalu 29 450, Koivistonluoto Varmuus rakennukselta, Pitkäaikainen vakavuus (Avoin), Keskivesi (MW) Kokonaisvarmuusmenetelmä, Bishop	
<i>Designer</i>	Teemu Vehviläinen	<i>Checker</i>	Marko Lehmikangas
<i>Date</i>	31.5.2021	<i>Scale</i>	1:350
<i>File Name</i>		Varmuus_Rakennukselta_Bishop.slim	



Project		Koivistonluodon ja Harmaalinnan rantojen stabiileettitarkastelu	
Author		Teemu Vehviläinen	Company AFRY Finland Oy
Date		June 15 2021, 04:15 PM	File Name 29450_Koivistonluoto.slide3m2
Analysis Jokipaalu 29 450, Koivistonluoto, Pitkäaikainen vakavuus (Avoin), Keskivesi (MW), Kokonaisvarmuusmenetelmä, Ellipsoidi liukupinta			

Liite 2 (28). Koivistonluodon laskentatulosteet



SLIDEINTERPRET 6.022



AFRY

ÄF PÖRY

AFRY Finland Oy
Elektroniikkatie 13, 90590 Oulu
Tel. 010 3311

Project

Koivistonluodon ja Harmaalinnan rantojen stabiileettitarkastelu

Analysis Description

Leikkaus jokipaalu 29 580, Koivistonluoto
Varmuus rakennukselta, Pitkäaikainen vakavuus (Avoin), Keskivesi (MW)
Kokonaisvarmuusmenetelmä, Bishop

Designer

Teemu Vehvilainen

Checker

Marko Lehmikangas

Scale

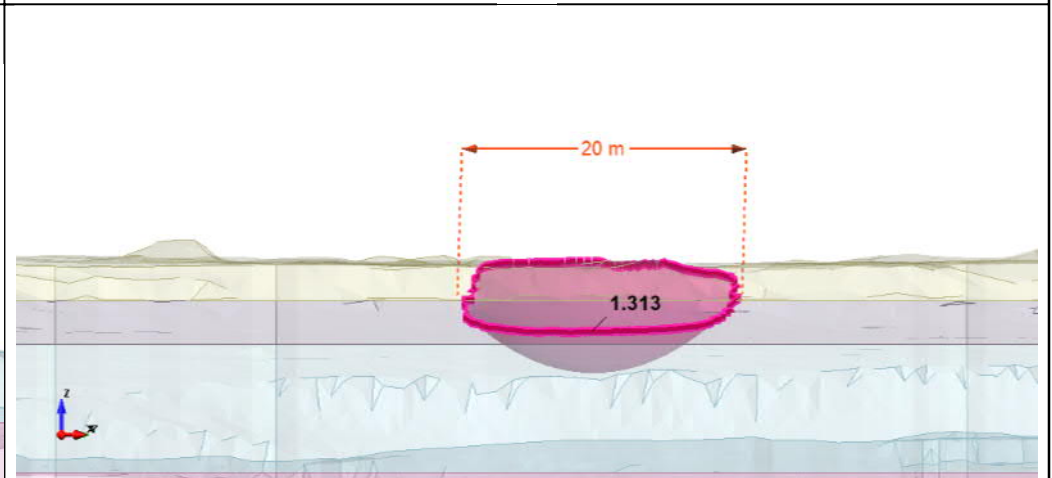
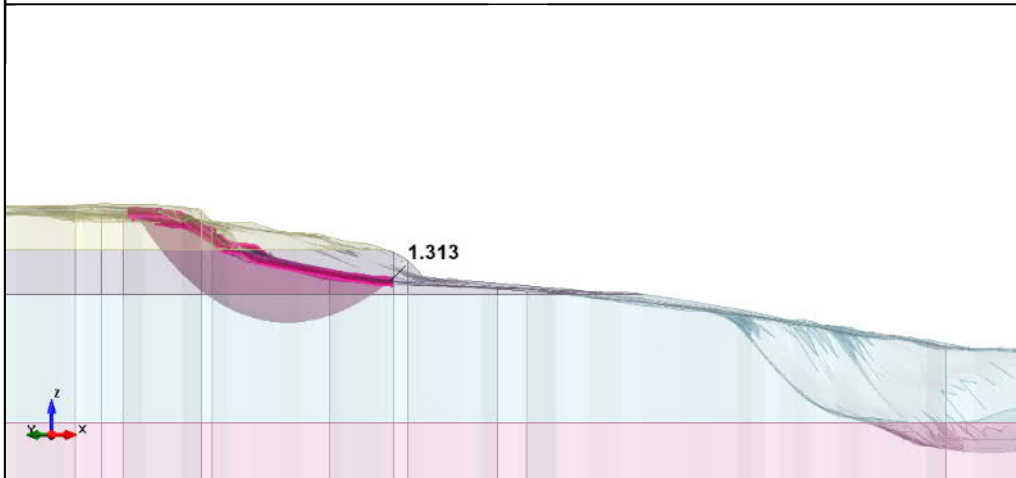
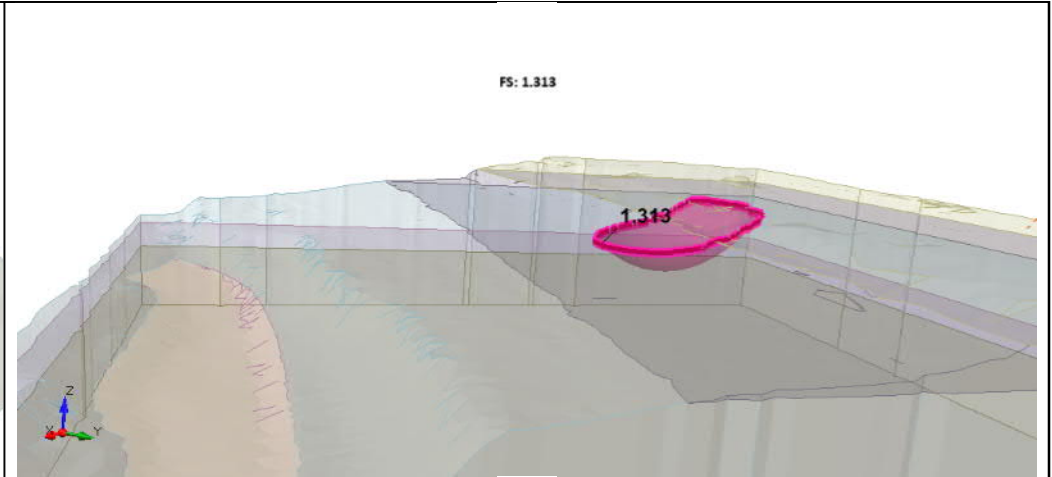
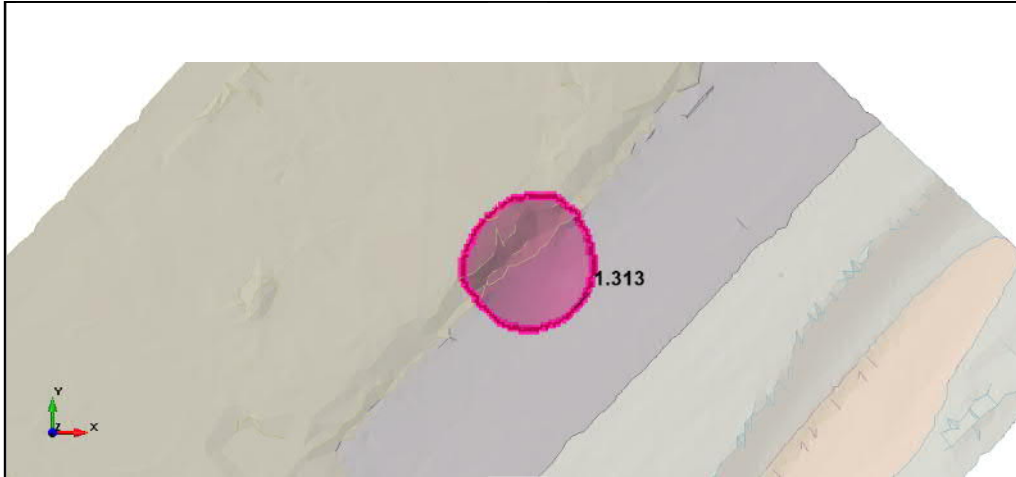
1:350

Date

31.5.2021

File Name

Varmuus_Rakennukselta_Bishop.slim



Project

Koivistonluodon ja Harmaalinnan rantojen stabiileettitarkastelu

Author

Teemu Vehviläinen

Company

AFRY Finland Oy

Date

June 15 2021, 04:37 PM

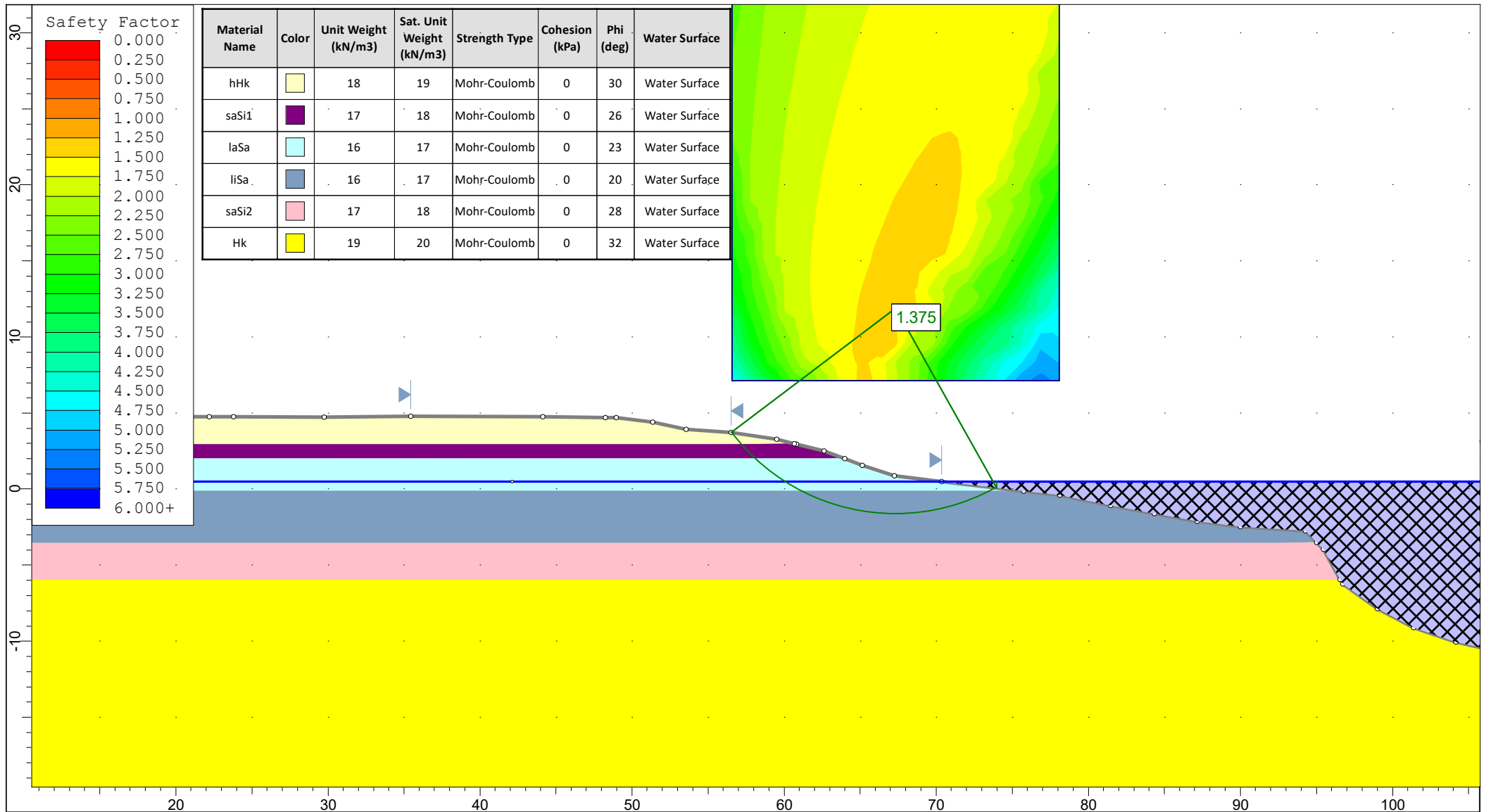
File Name


29580_Koivistonluoto.slide3m2

Analysis

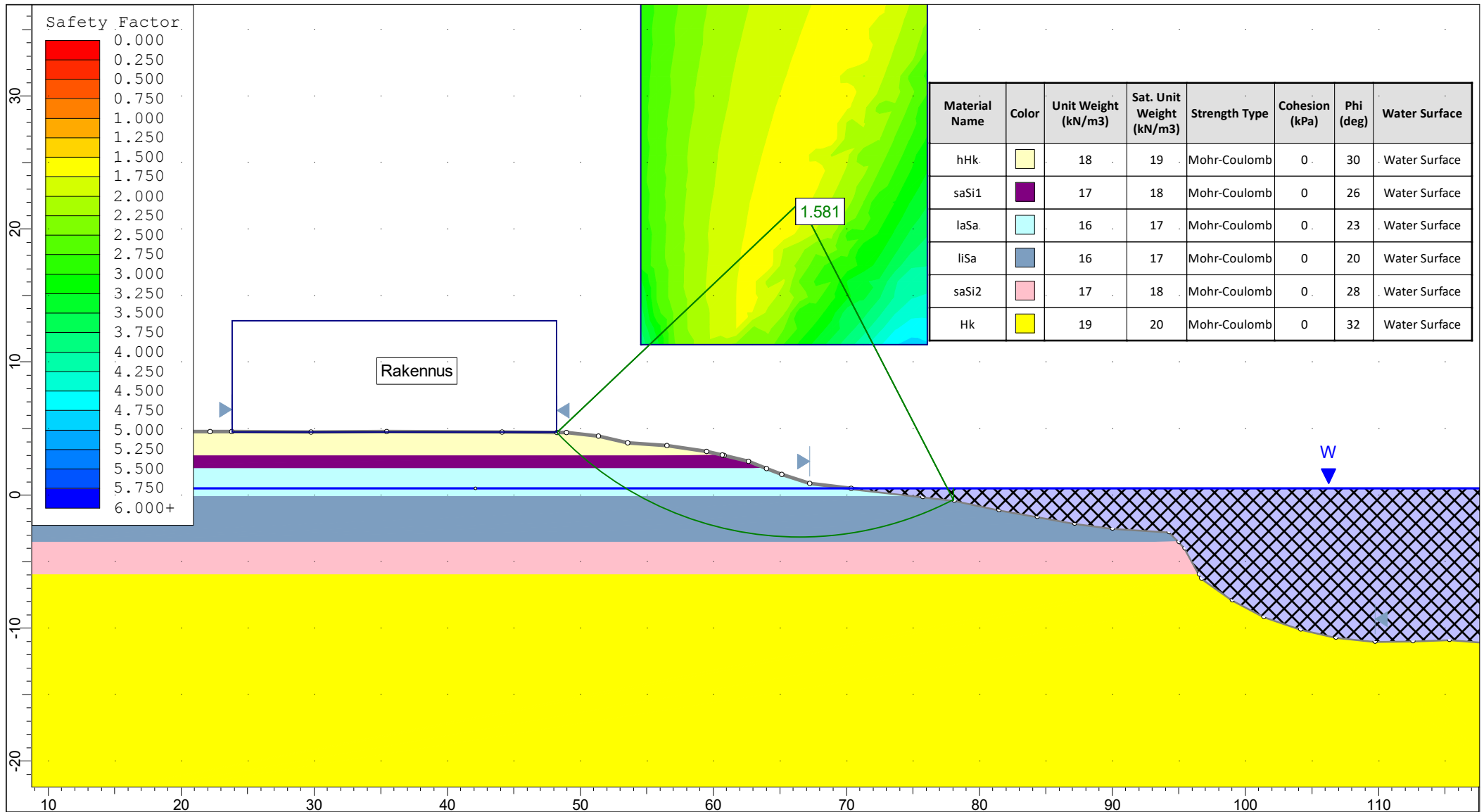
Jokipaalu 29 580, Koivistonluoto, Pitkäaikainen vakavuus (Avoin), Keskivesi (MW), Kokonaisvarmuusmenetelmä, Ellipsoidi liukupinta

Liite 2 (30). Koivistonluodon laskentatulosteet




SLIDEINTERPRET 6.027  AFRY AF PÖYRY AFRY Finland Oy Elektroniikkatie 13, 90590 Oulu Tel. 010 3311	Project Koivistonluodon ja Harmaalinnan rantojen stabiileettitarkastelu		
	Analysis Description Leikkaus jokipaalu 29 700, Koivistonluoto Pitkäaikainen vakavuus (Avoin), Keskivesi (MW) Kokonaisvarmuusmenetelmä, Bishop		
	Designer Teemu Vehviläinen	Checker Marko Lehmikangas	Scale 1:350
	Date 31.5.2021	File Name Avoin_MW_Bishop.slim	

Liite 2 (31). Koivistonluodon laskentatulosteet



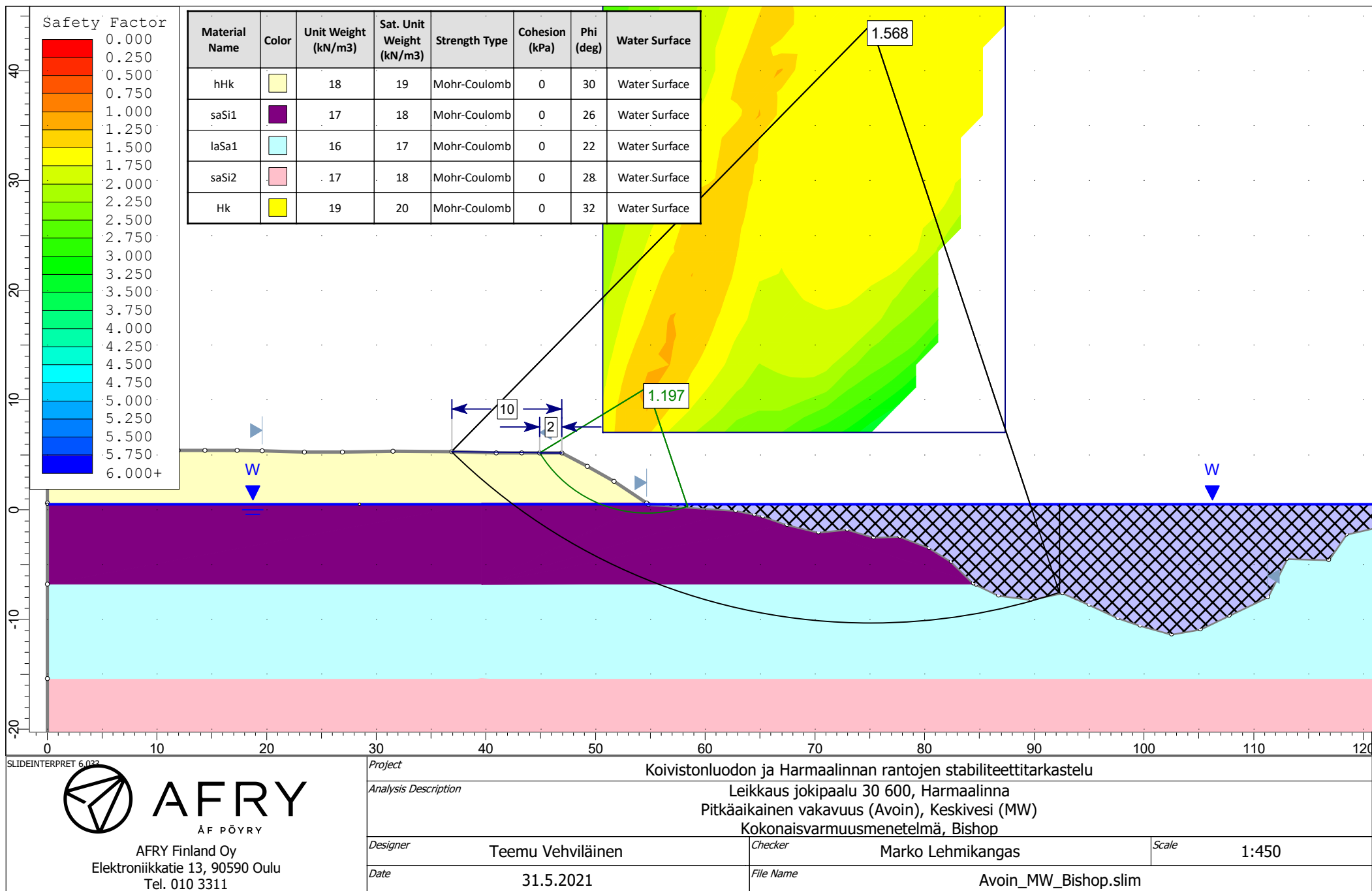
SLIDEINTERPRET 6.022

**AFRY**
AF PÖYRY

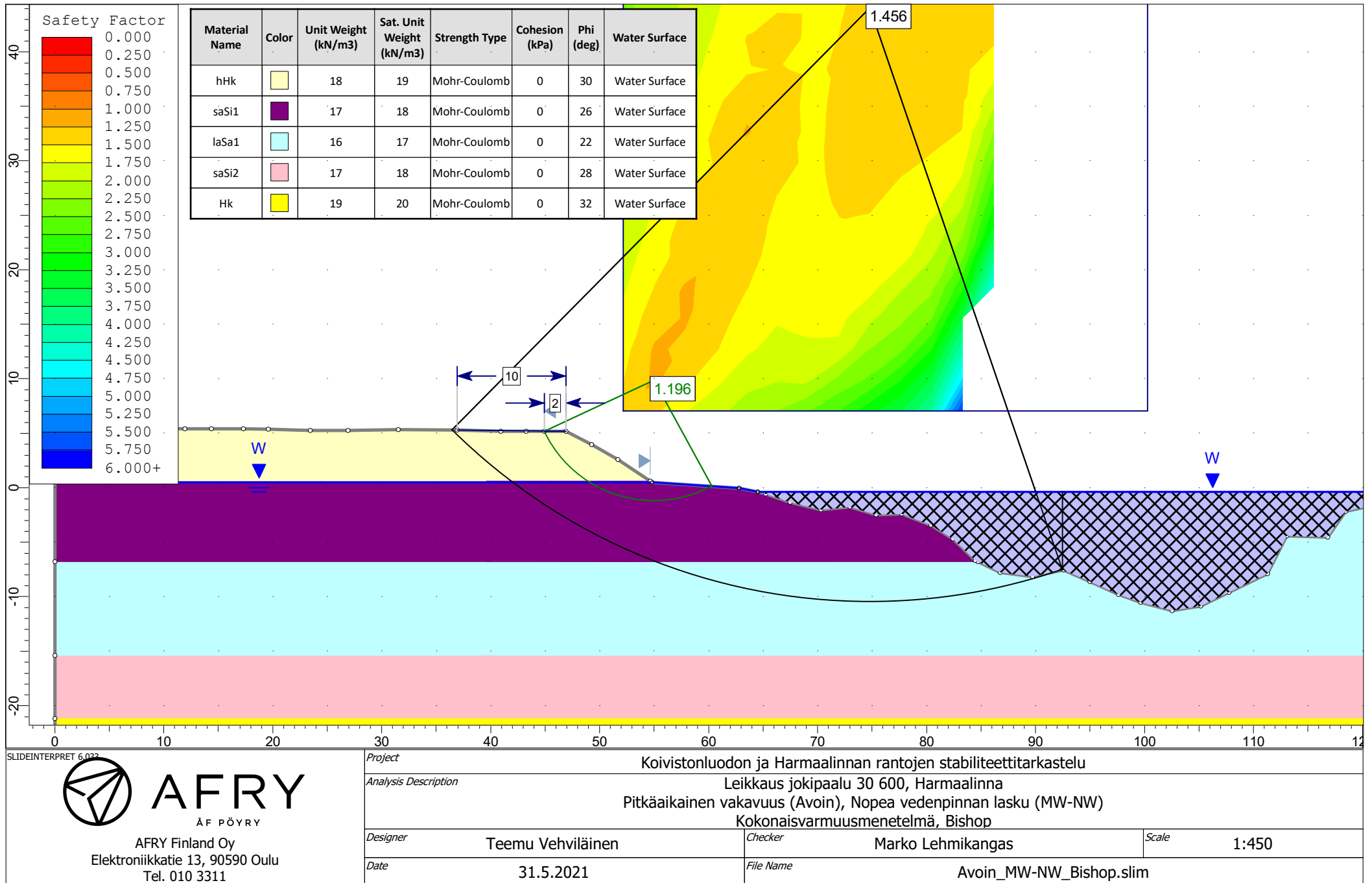
AFRY Finland Oy
Elektroniikkatie 13, 90590 Oulu
Tel. 010 3311

<i>Project</i>		Koivistonluodon ja Harmaalinnan rantojen stabiileettitarkastelu	
<i>Analysis Description</i>		Leikkaus jokipaalu 29 700, Koivistonluoto Varmuus rakennukselta, Pitkäaikainen vakavuus (Avoin), Keskivesi (MW) Kokonaisvarmuusmenetelmä, Bishop	
<i>Designer</i>	Teemu Vehviläinen	<i>Checker</i>	Marko Lehmikangas
<i>Date</i>	31.5.2021	<i>Scale</i>	1:400
		<i>File Name</i>	Varmuus_Rakennukselta_Bishop.slim

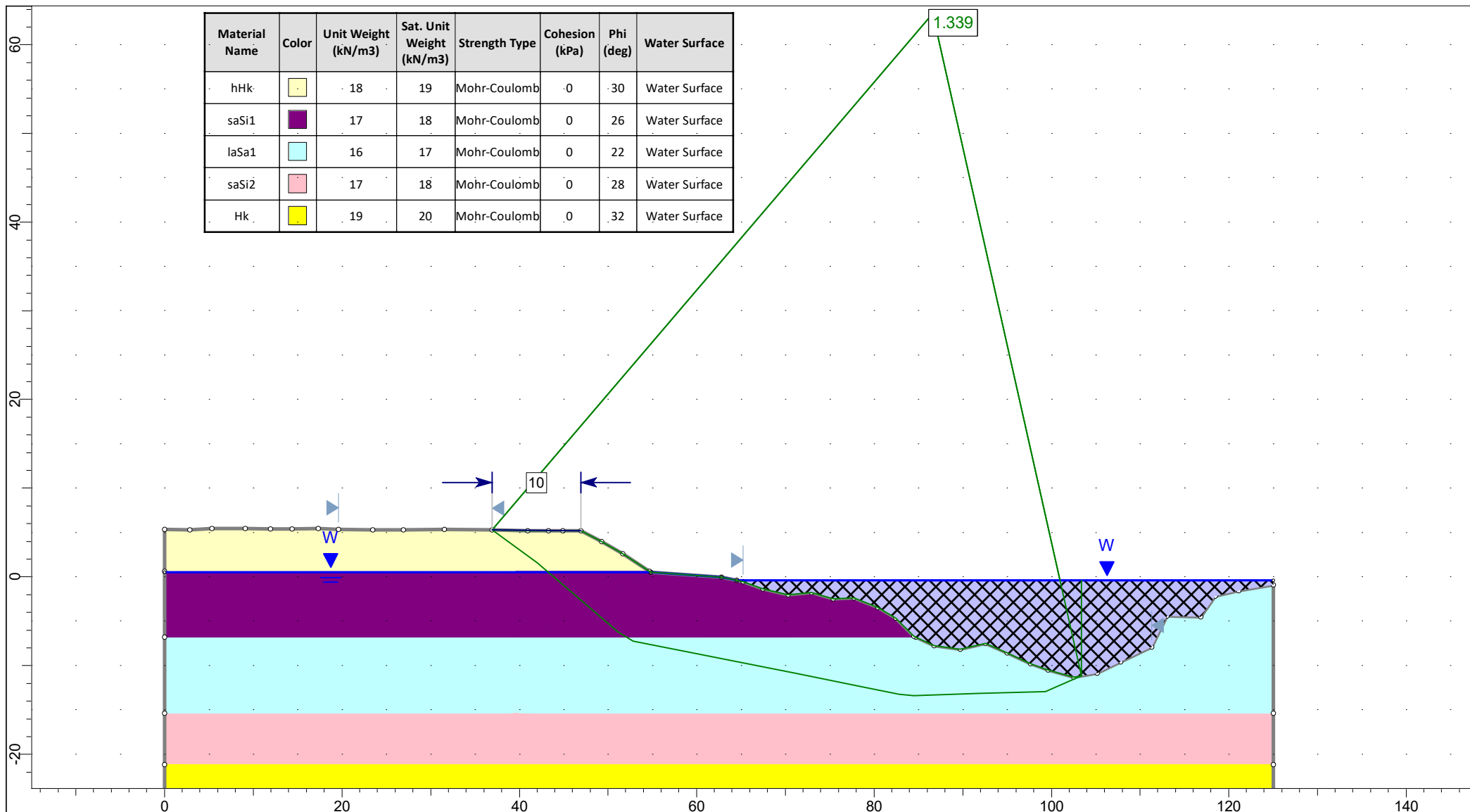
Liite 3 (1). Harmaalinnan laskentatulosteet



Liite 3 (2). Harmaalinnan laskentatulosteet



Liite 3 (3). Harmaalinnan laskentatulosteet



SLIDEINTERPRET 6.027



AFRY

AF PÖYRY

AFRY Finland Oy
Elektronikkatie 13, 90590 Oulu
Tel. 010 3311

Project

Koivistonluodon ja Harmaalinnan rantojen stabiilitetarkastelu

Analysis Description

Leikkaus jokipaalu 30 600, Harmaalinna
Pitkäaikainen vakavuus (Avoin), Nopea vedenpinnan lasku (MW-NW)
Kokonaisvarmuusmenetelmä, Morgenstern-Price

Designer

Teemu Vehviläinen

Checker

Marko Lehmikangas

Scale

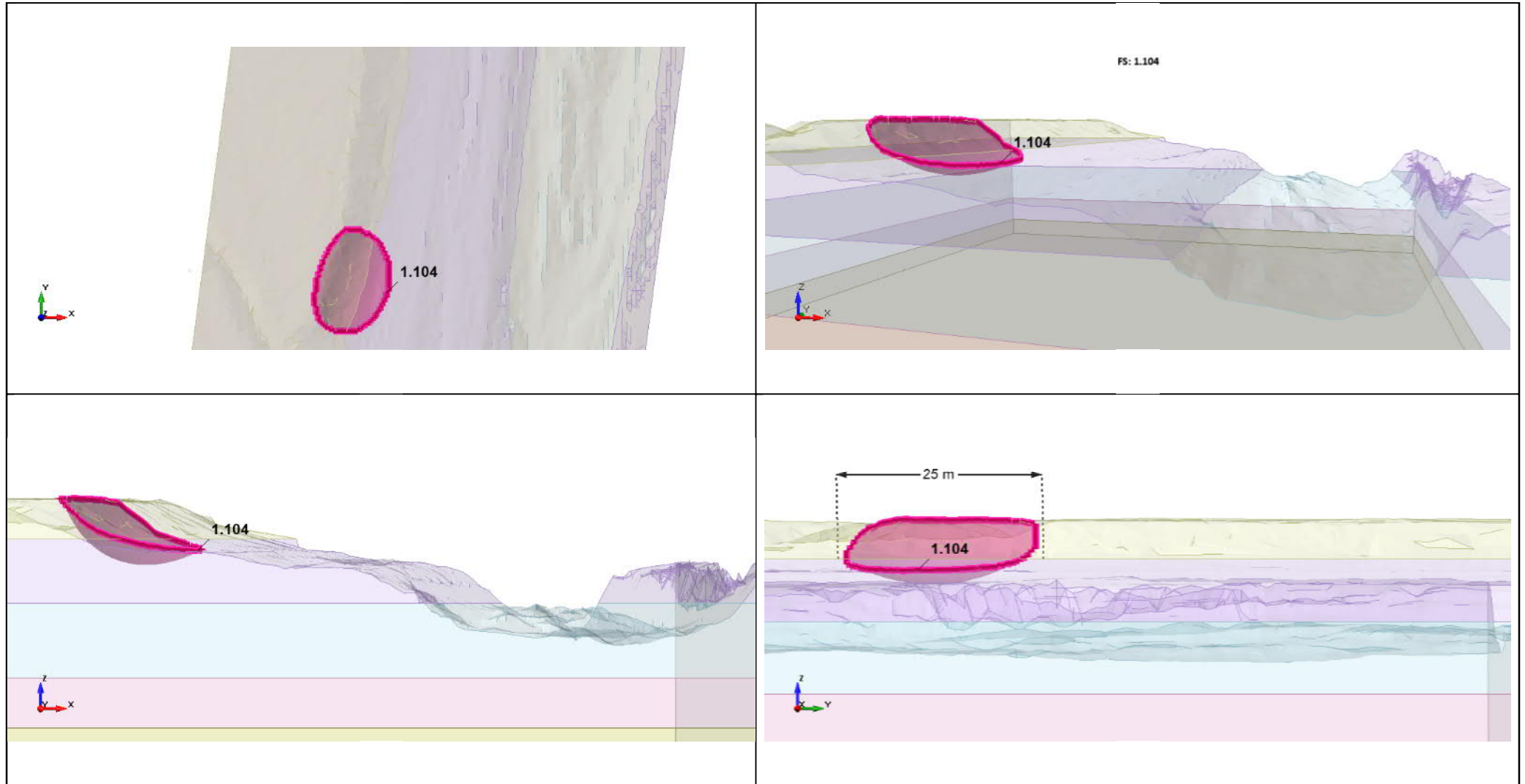
1:600

Date

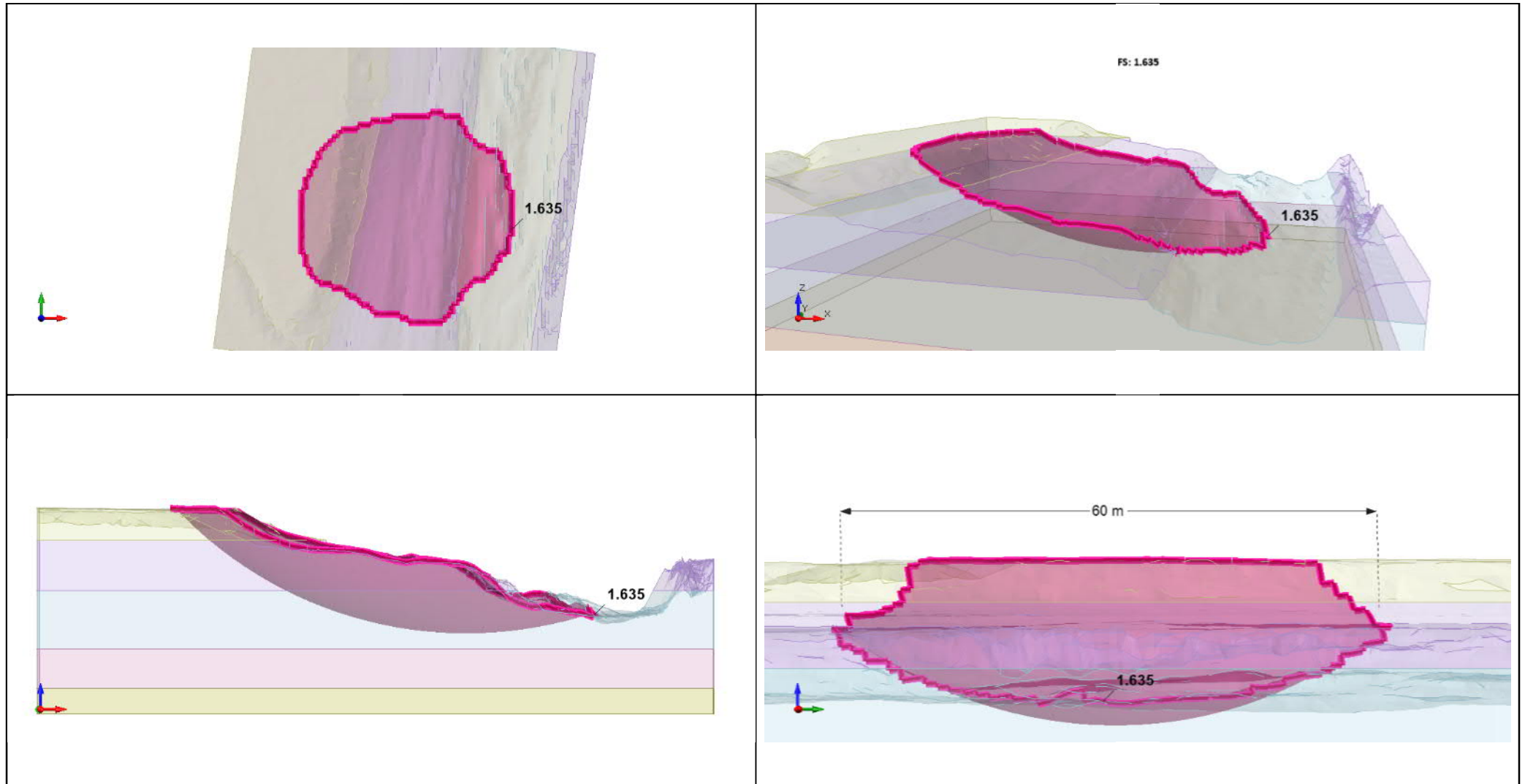
31.5.2021

File Name

Avoin_MW-NW_Morgenstern-Price.slim

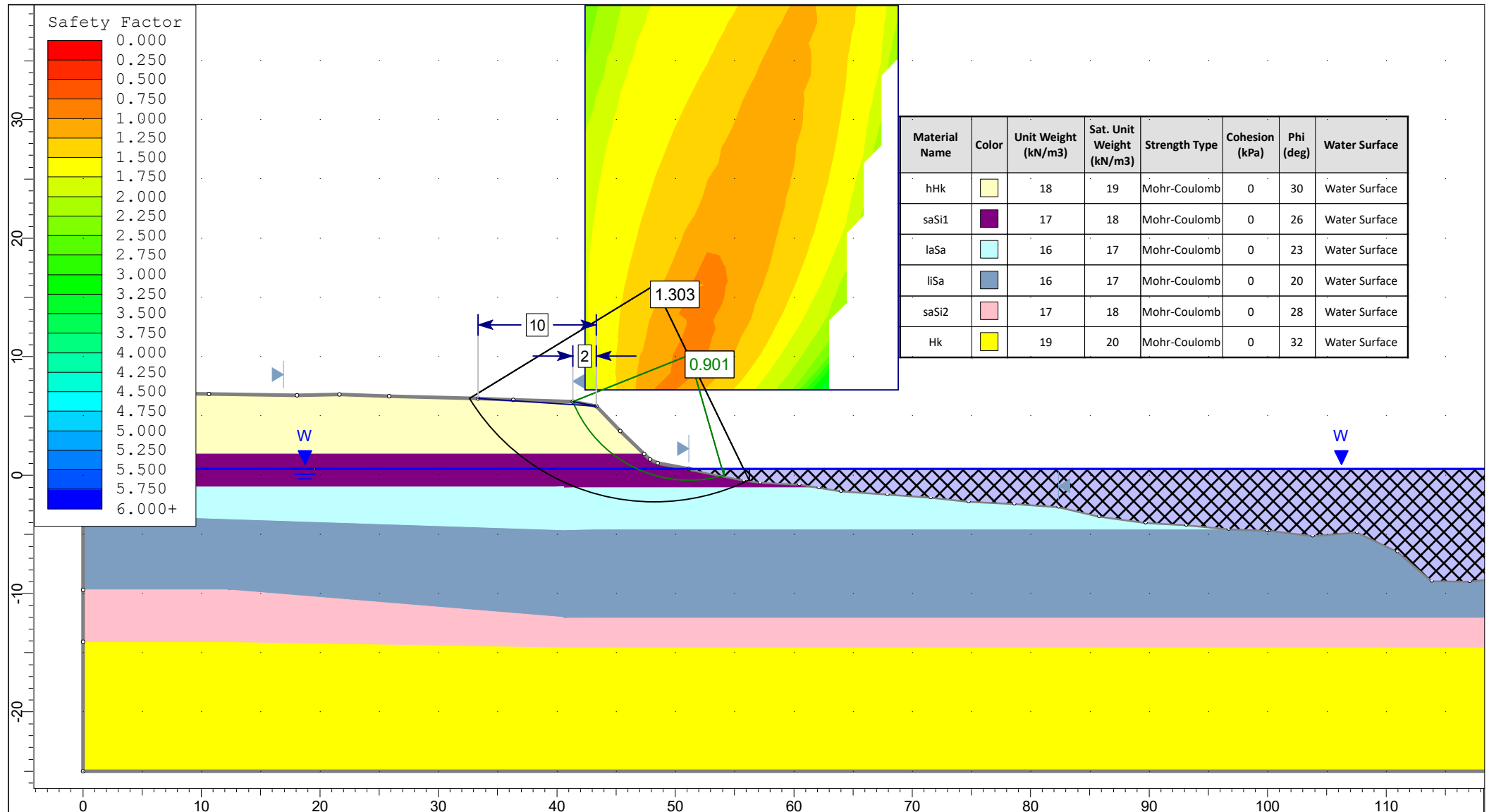


Project		Koivistonluodon ja Harmaalinnan rantojen stabiileettitarkastelu	
Author		Teemu Vehviläinen	Company AFRY Finland Oy
Date		June 16 2021, 08:29 AM	File Name 30600-2m_Harmaalinna.slide3m2
Analysis Jokipaalu 30 600, Harmaalinna, Pitkäaikainen vakavuus (Avoin), Keskivesi (MW), Kokonaisvarmuusmenetelmä, Ellipsoidi lyhyt (2 m) liukupinta			



Project		Koivistonluodon ja Harmaalinnan rantojen stabiileettitarkastelu	
Author		Teemu Vehviläinen	Company AFRY Finland Oy
Date		June 16 2021, 10:27 AM	File Name 30600_Harmaalinna.slide3m2
Analysis Jokipaalu 30 600, Harmaalinna, Pitkäaikainen vakavuus (Avoin), Keskivesi (MW), Kokonaisvarmuusmenetelmä, Ellipsoidi pitkä (10 m) liukupinta			

Liite 3 (6). Harmaalinnan laskentatulosteet



SLIDEINTERPRET 6.027



AFRY

ÄF PÖYRY

AFRY Finland Oy
Elektroniikkatie 13, 90590 Oulu
Tel. 010 3311

Project

Koivistonluodon ja Harmaalinnan rantojen stabiileettitarkastelu

Analysis Description

Leikkaus jokipaalu 31 450, Harmaalinna
Pitkäaikainen vakavuus (Avoin), Keskivesi (MW)
Kokonaisvarmuusmenetelmä, Bishop

Designer

Teemu Vehviläinen

Checker

Marko Lehmikangas

Scale

1:450

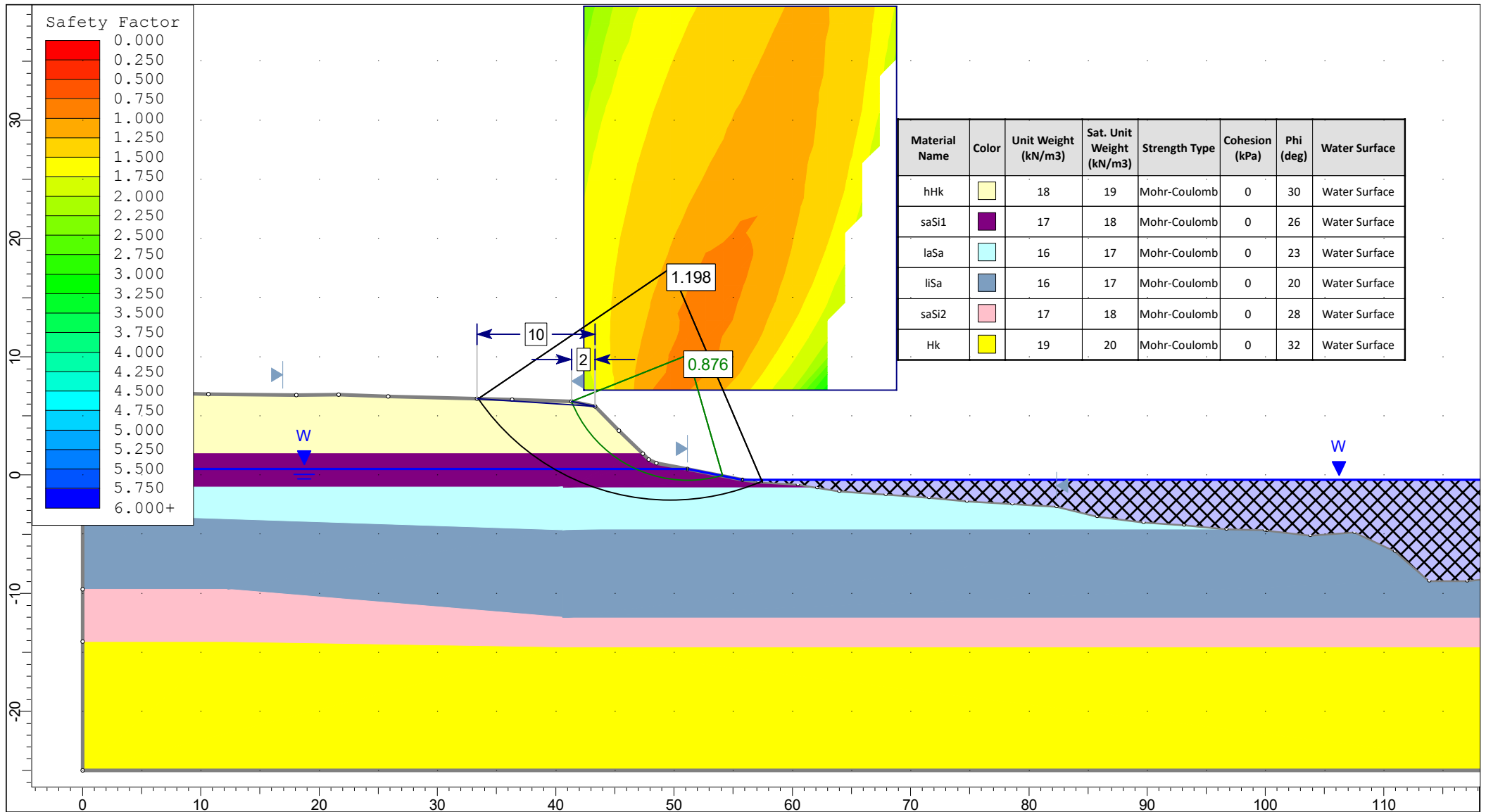
Date

31.5.2021


File Name

Avoin_MW_Bishop.slim

Liite 3 (7). Harmaalinnan laskentatulosteet



SLIDEINTERPRET 6.027



AFRY

AF PÖYRY

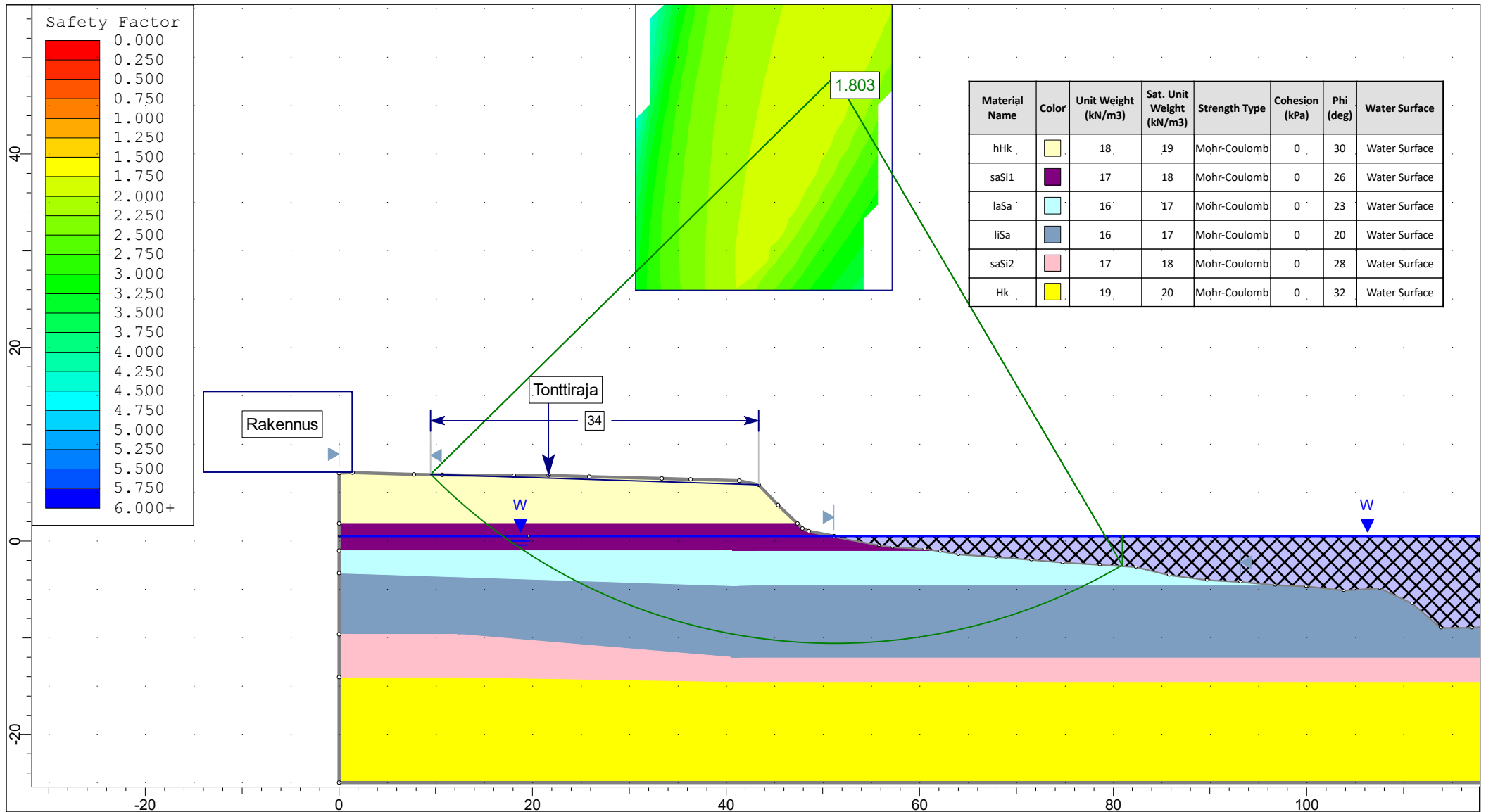
AFRY Finland Oy

Elektroniikkatie 13, 90590 Oulu


Tel. 010 3311

<i>Project</i>		Koivistonluodon ja Harmaalinnan rantojen stabiileettitarkastelu	
<i>Analysis Description</i>		Leikkaus jokipaalu 31 450, Harmaalinna Pitkäaikainen vakavuus (Avoin), Nopea vedenpinnan lasku (MW-NW) Kokonaisvarmuusmenetelmä, Bishop	
<i>Designer</i>	Teemu Vehviläinen	<i>Checker</i>	Marko Lehmikangas
<i>Date</i>	31.5.2021	<i>Scale</i>	1:450
		<i>File Name</i>	Avoin_MW-NW_Bishop.slim

Liite 3 (8). Harmaalinnan laskentatulosteet



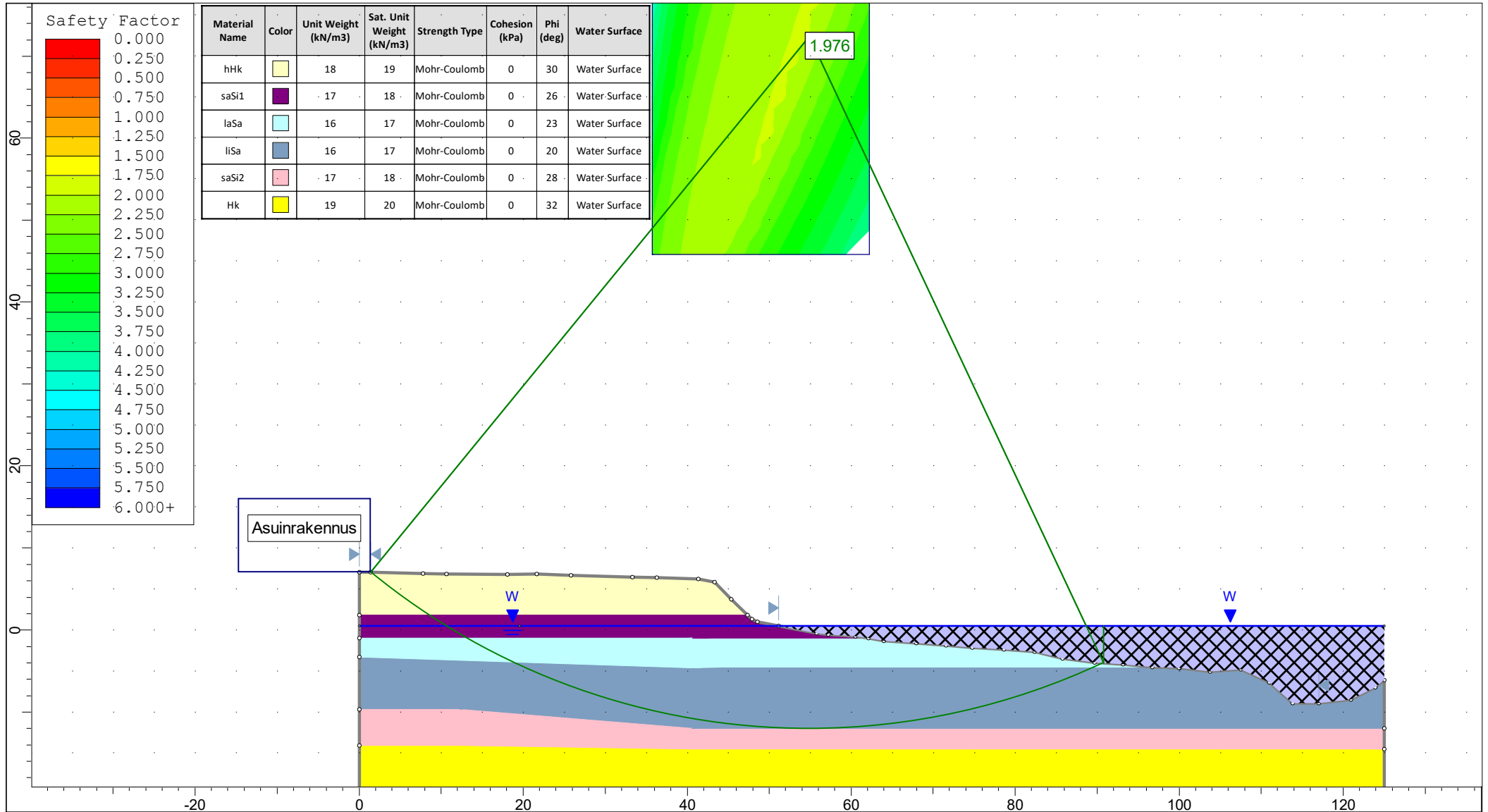
SLIDEINTERPRET 6.027

**AFRY**
AF PÖYRY


AFRY Finland Oy
Elektroniikkatie 13, 90590 Oulu
Tel. 010 3311

Project				Koivistonluodon ja Harmaalinnan rantojen stabiileittitarkastelu							
Analysis Description				Leikkaus jokipaalu 31 450, Harmaalinna Turvallinen rakentamisetäisyys (F>1.8), Pitkäaikainen vakavuus (Avoin), Keskivesi (MW) Kokonaisvarmuusmenetelmä, Bishop							
Designer		Teemu Vehviläinen		Checker		Marko Lehmikangas		Scale		1:550	
Date		31.5.2021		File Name		F_1.8_Etäisyys_Bishop.slim					

Liite 3 (9). Harmaalinnan laskentatulosteet

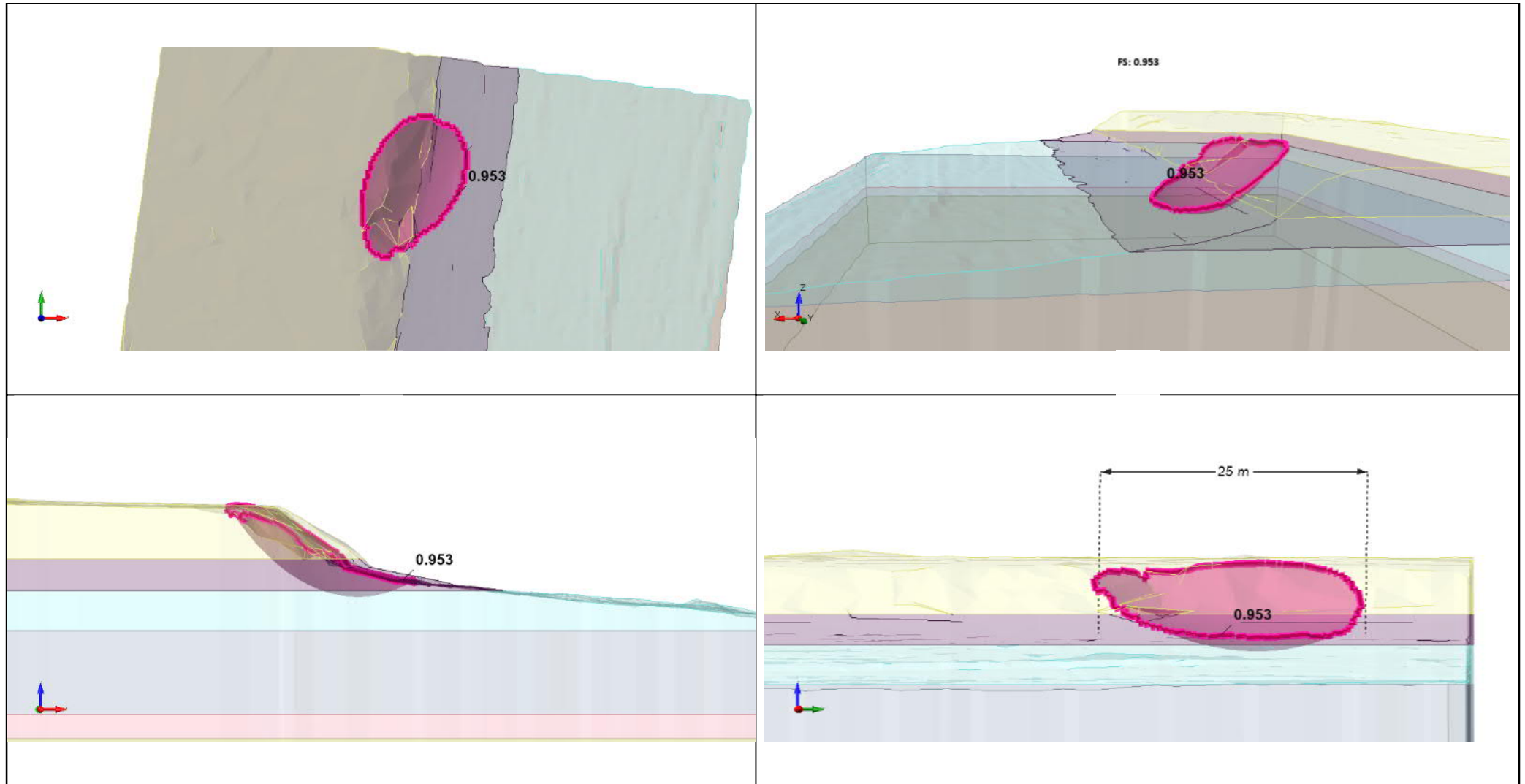


SLIDEINTERPRET 6.027

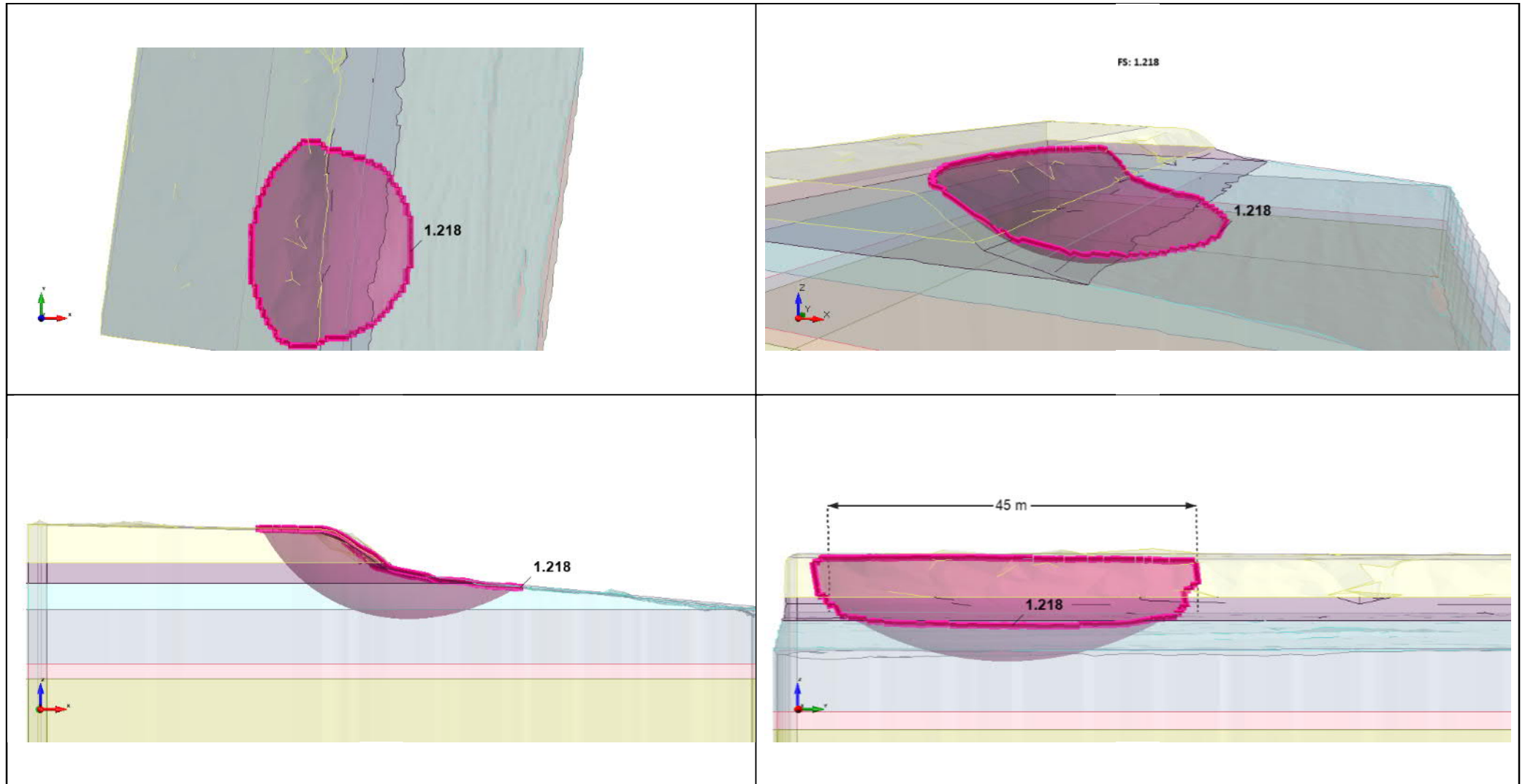
**AFRY**
AF PÖYRY

AFRY Finland Oy
Elektroniikkatie 13, 90590 Oulu
Tel. 010 3311

Project		Koivistonluodon ja Harmaalinnan rantojen stabiileettitarkastelu	
Analysis Description		Leikkaus jokipaalu 31 450, Harmaalinna Varmuus rakennukselta, Pitkäaikainen vakavuus (Avoin), Keskivesi (MW) Kokonaisvarmuusmenetelmä, Bishop	
Designer	Teemu Vehvilainen	Checker	Marko Lehmikangas
Date	31.5.2021	Scale	1:650
		File Name	Varmuus_Rakennukselta_Bishop.slim

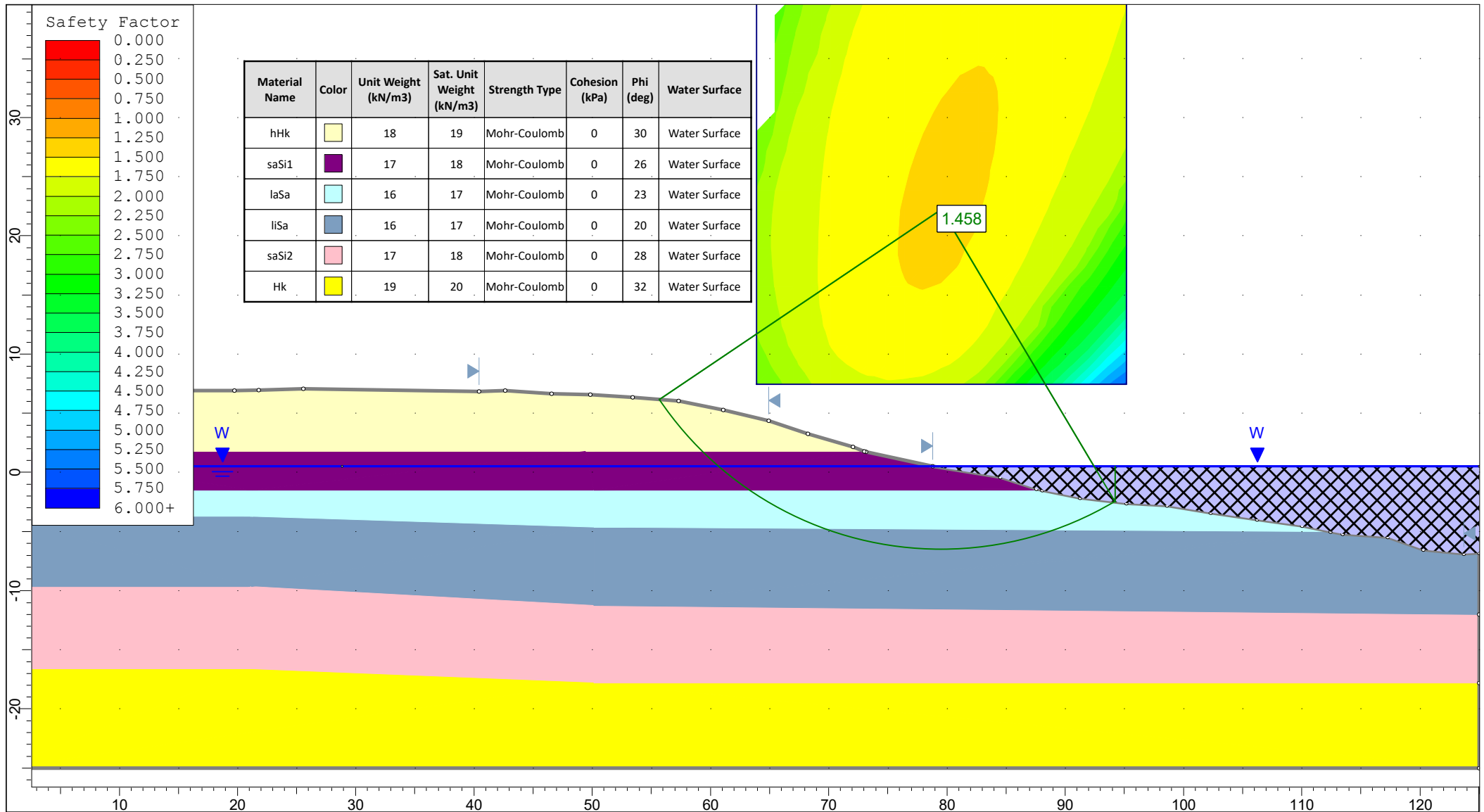



Project Koivistonluodon ja Harmaalinnan rantojen stabiiteettitarkastelu		
Author Teemu Vehviläinen		Company AFRY Finland Oy
Date June 16 2021, 12:20 PM		File Name 31450-2m_Harmaalinna.slide3m2
Analysis Jokipaalu 31 450, Harmaalinna, Pitkäaikainen vakavuus (Avoin), Keskivesi (MW), Kokonaisvarmuusmenetelmä, Ellipsoidi lyhyt (2 m) liukupinta		



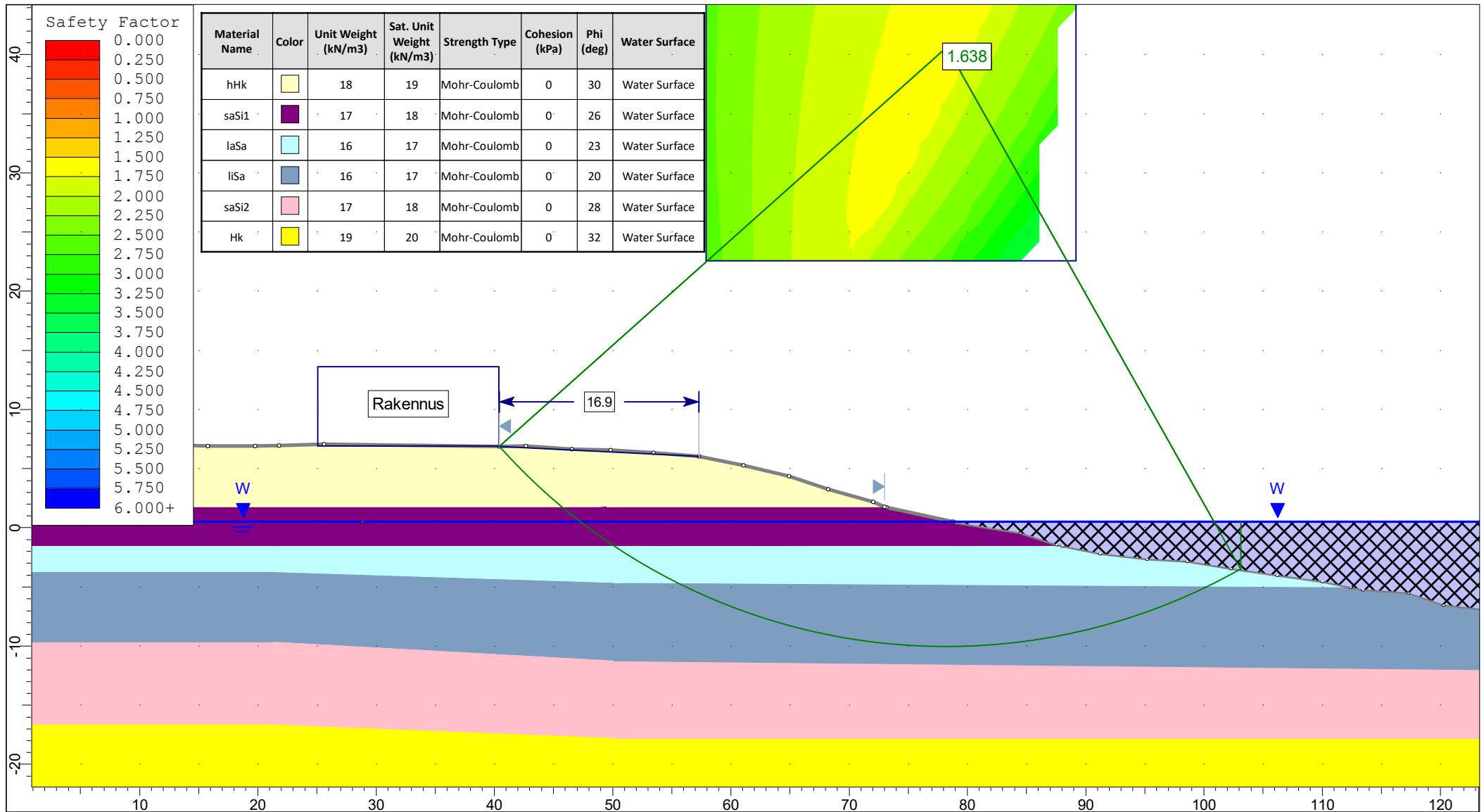
Project			Koivistonluodon ja Harmaalinnan rantojen stabiileettitarkastelu	
Author		Teemu Vehviläinen	Company	AFRY Finland Oy
Date		June 16 2021, 11:43 AM	File Name	31450_Harmaalinna.slide3m2
Analysis		Jokipaalu 31 450, Harmaalinna, Pitkäaikainen vakavuus (Avoin), Keskivesi (MW), Kokonaisvarmuusmenetelmä, Ellipsoidi pitkä (10 m) liukupinta		

Liite 3 (12). Harmaalinna laskentatulosteet




SLIDEINTERPRET 6.022  AFRY AF PÖYRY AFRY Finland Oy Elektroniikkatie 13, 90590 Oulu Tel. 010 3311	Project			Koivistonluodon ja Harmaalinna rantojen stabiilitetarkastelu		
	Analysis Description			Leikkaus jokipaalu 31 650, Harmaalinna Pitkäaikainen vakavuus (Avoin), Keskivesi (MW) Kokonaisvarmuusmenetelmä, Bishop		
	Designer			Teemu Vehviläinen	Checker	Marko Lehmikangas
	Date			31.5.2021	File Name	Avoin_MW_Bishop.slim
				Scale		1:450

Liite 3 (13). Harmaalinna laskentatulosteet



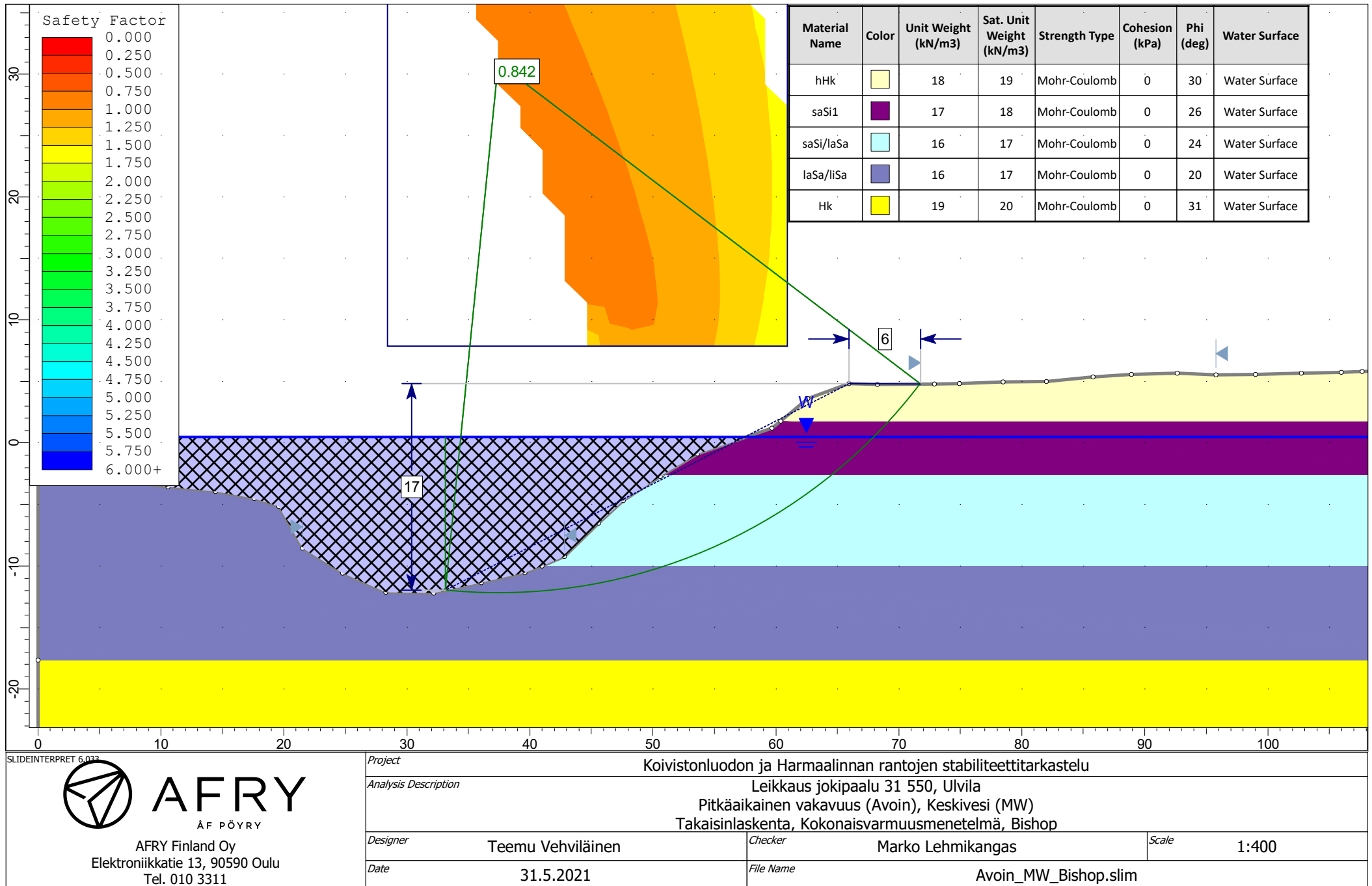
SLIDEINTERPRET 6.027

**AFRY**
ÅF PÖYRY

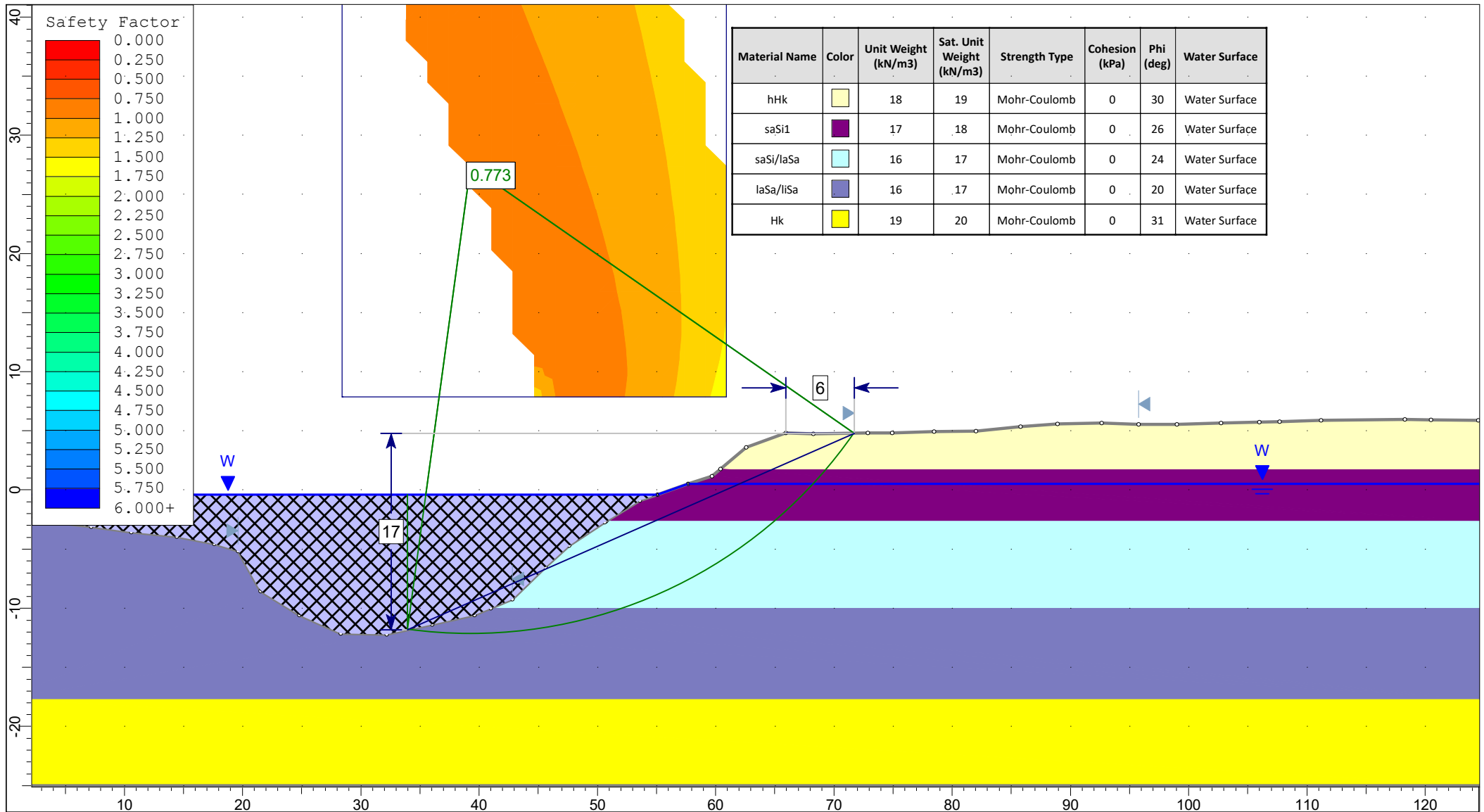
AFRY Finland Oy
Elektroniikkatie 13, 90590 Oulu
Tel. 010 3311

Project		Koivistonluodon ja Harmaalinna rantojen stabiilitetitarkastelu	
Analysis Description		Leikkaus jokipaalu 31 650, Harmaalinna Varmuus rakennukselta, Pitkäaikainen vakavuus (Avoim), Keskivesi (MW) Kokonaisvarmuusmenetelmä, Bishop	
Designer	Teemu Vehvilainen	Checker	Marko Lehmikangas
Date	31.5.2021	File Name	Varmuus_Rakennukselta_Bishop.slm
		Scale	1:450


Liite 4 (1). Takaisinlaskennan tulosteet



Liite 4 (2). Takaisinlaskennan tulosteet



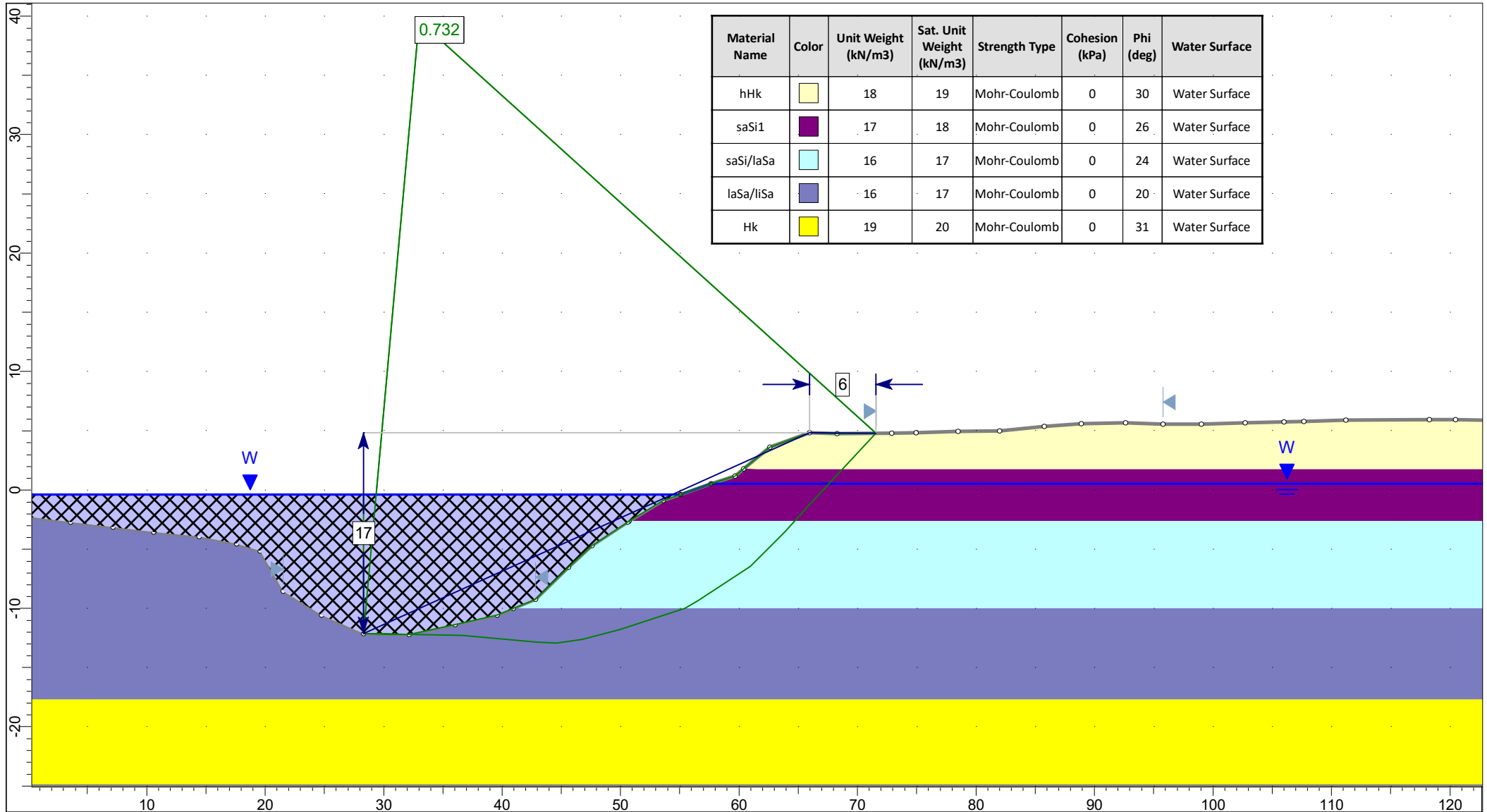
SLIDEINTERPRET 6.027

**AFRY**
AF PÖYRY


AFRY Finland Oy
Elektroniikkatie 13, 90590 Oulu
Tel. 010 3311

<i>Project</i>		Koivistonluodon ja Harmaalinnan rantojen stabiilitietarkastelu	
<i>Analysis Description</i>		Leikkaus jokipaalu 31 550, Ulvila Pitkäaikainen vakavuus (Avoim), Nopea vedenpinnan lasku (MW-NW) Takaisinlaskenta, Kokonaisvarmuusmenetelmä, Bishop	
<i>Designer</i>	Teemu Vehviläinen	<i>Checker</i>	Marko Lehmikangas
<i>Date</i>	31.5.2021	<i>Scale</i>	1:450
<i>File Name</i>	Avoim_MW-NW_Bishop.slim		

Liite 4 (3). Takaisinlaskennan tulosteet

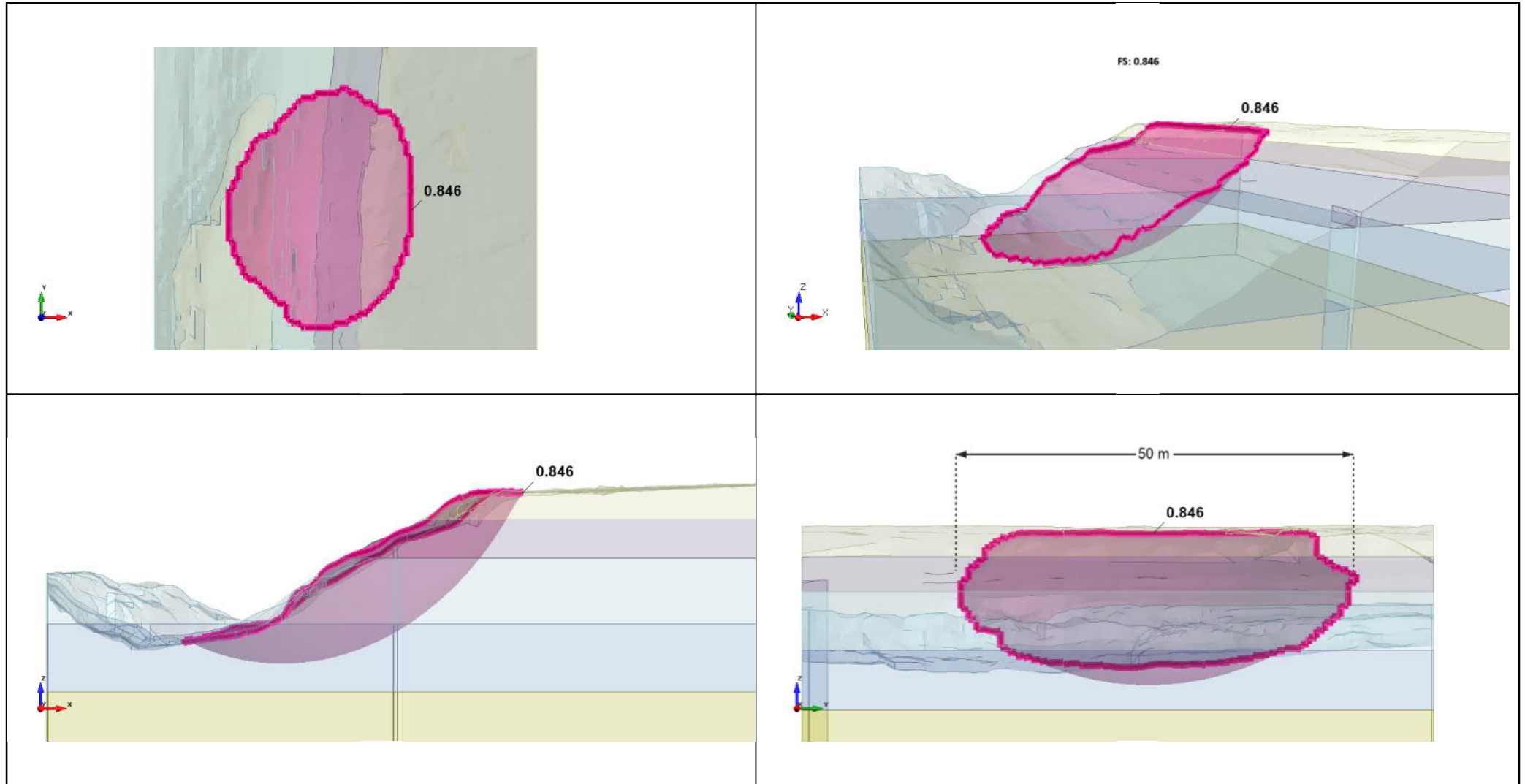


SLIDEINTERPRET 6.023

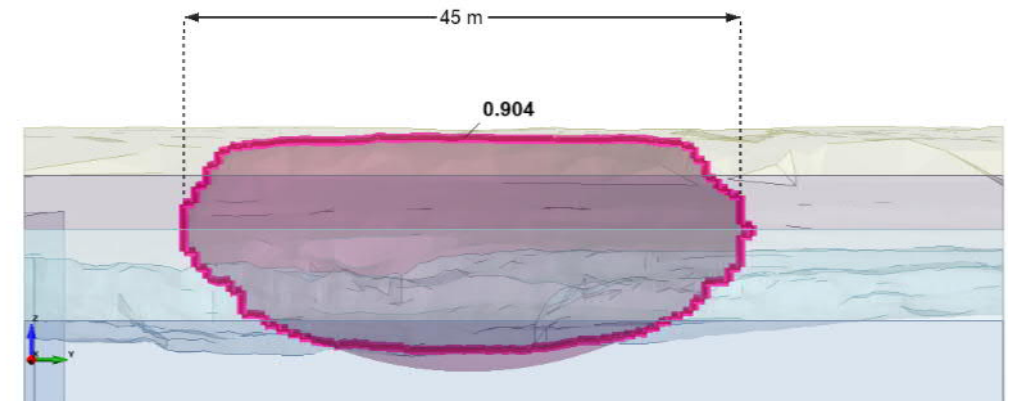
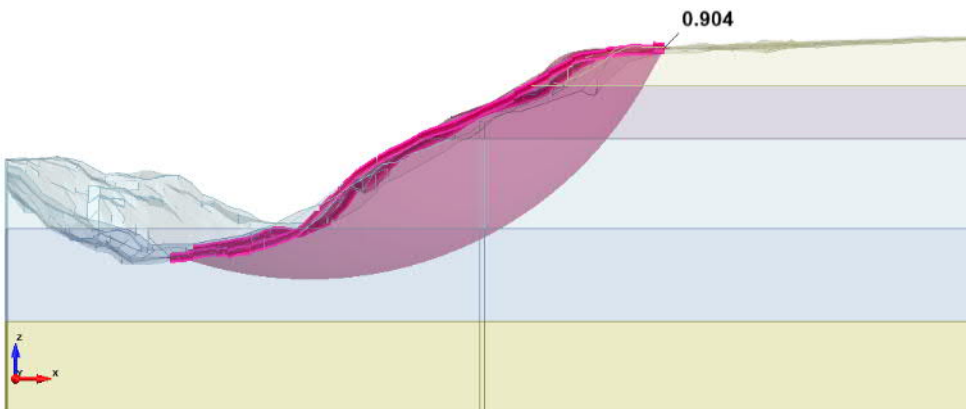
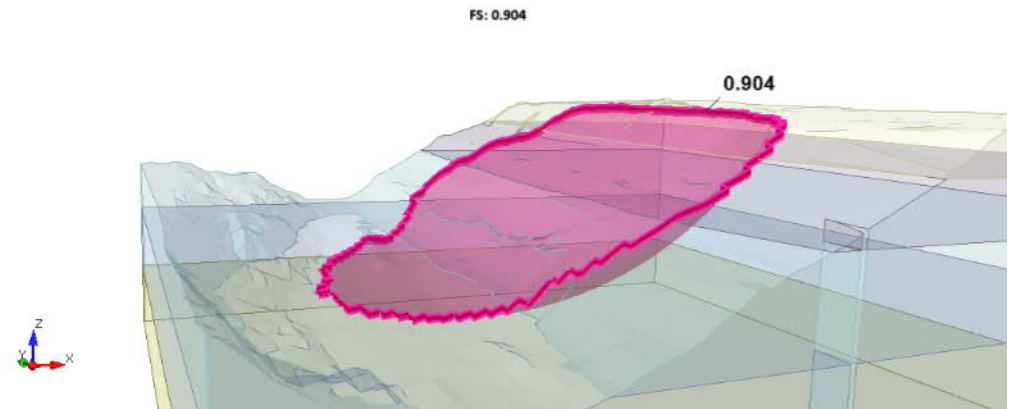
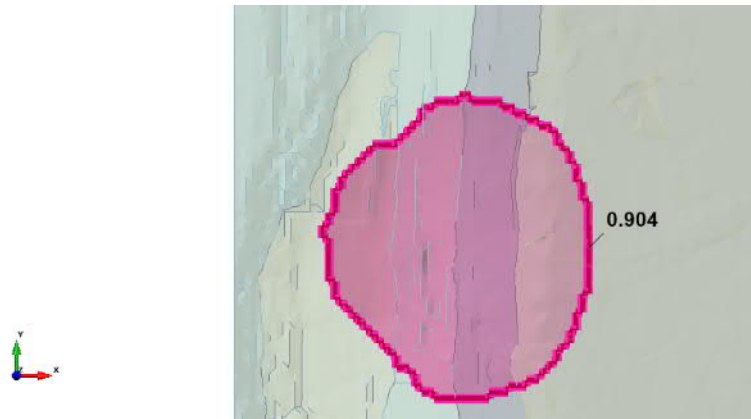
**AFRY**
Ä F P Ö R Y

AFRY Finland Oy
Elektroniikkatie 13, 90590 Oulu
Tel. 010 3311

<i>Project</i>		Koivistonluodon ja Harmaalinnan rantojen stabiileettitarkastelu	
<i>Analysis Description</i>		Leikkaus jokipaalu 31 550, Ulvila Pitkäaikainen vakavuus (Avoim), Nopea vedenpinnan lasku (MW-NW) Takaisinlaskenta, Kokonaisvarmuusmenetelmä, Morgenstern-Price	
<i>Designer</i>	Teemu Vehviläinen	<i>Checker</i>	Marko Lehmikangas
<i>Date</i>	31.5.2021	<i>Scale</i>	1:450
<i>File Name</i>	Avoim_MW-NW_Morgenstern-Price.slim		



Project			Koivistonluodon ja Harmaalinnan rantojen stabiileettitarkastelu		
Author			Teemu Vehviläinen		Company
					AFRY Finland Oy
Date			June 16 2021, 12:28 PM		File Name
					31550_Ulvila.slide3m2
Analysis			Takaisinlaskenta jokipaalu 31 550, Ulvila, Pitkäaikainen vakavuus (Avoin), Keskivesi (MW), Kokonaisvarmuusmenetelmä, Ellipsoidi liukupinta		



Project

Koivistonluodon ja Harmaalinnan rantojen stabiileettitarkastelu

Author

Teemu Vehviläinen

Company

AFRY Finland Oy

Date

June 16 2021, 12:39 PM

File Name

31550_Ulvila.slide3m2

Analysis

Takaisinlaskenta jokipaalu 31 550, Ulvila, Pitkäaikainen vakavuus (Avoin), Keskivesi (MW), Kokonaisvarmuusmenetelmä, Pallo liukupinta